



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería



Diseño e Implementación de una
Punta de Prueba Activa Diferencial

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

Ingeniero Eléctrico Electrónico

P r e s e n t a

Alvaro Sánchez Canudas

Director de Tesis

Ing. Rodolfo Peters Lammel

Septiembre de 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A lo largo de la vida siempre hay un momento en el que debemos detenernos a ser agradecidos con aquellos que nos han dado una parte de si; A aquellas personas sin las cuales nuestro presente sería diferente. Es en ese momento de reflexión en el que uno explora y reconoce cada parte de si mismo y recuerda a aquellos que lo han enseñado y lo han guiado o de quienes se ha aprendido algo por observación o admiración. Así, el día de hoy me detengo a reflexionar y quiero agradecer:

En lo familiar a

Mi madre, quién gracias a su visión, apoyo y confianza el día de hoy soy quién soy.

Mi padre, por su apoyo incondicional y por sus enseñanzas.

Mi hermano, por tener fe en mi y ayudarme a ser cada día mejor.

Mi novia por vivir junto conmigo la emoción de estudiar una ingeniería, por su apoyo y su confianza.

En lo académico a:

Mi director de tesis Rodolfo Peters Lammel por su enseñanza dentro y fuera de las aulas, por su confianza y por entregarse a la academia. Un Ingeniero digno de ser admirado.

A Horacio Sandoval Rodríguez por sus enseñanzas de vida y ser un invaluable amigo de quién siempre he tenido apoyo y me enseñó que depende del sapo es la pedrada.

A Alejandro Sosa Fuentes, con quién se cierra un ciclo que comenzó cuando se presentó como mi tutor y me recibió de la mejor manera en la Facultad y hoy se cierra al estar presente en el momento de terminar el camino.

A todos mis demás profesores que a lo largo de la carrera compartieron sus conocimientos y experiencias conmigo y mis compañeros.

En lo personal a:

Guillermo Vargas Carrillo, amigo de toda la vida quién me enseñó a soñar y con quién descubrí que no hay límites.

Alejandro Maciel Ortiz, amigo de muchos años y a quién agradezco sus pláticas domingueras que me ayudan a quitarme lo cuadrado y mejorar como persona.

Dayman Sierra Cortés, primero amigo y después compañero de la facultad con quién platico y sueño sobre ingeniería y con quién disfruto aprender nuevas cosas y emprender nuevas ideas.

A todas aquellas personas que me ha faltado nombrar pero merecen mi gratitud.

México, D.F., Septiembre de 2007

Tabla de contenidos

INTRODUCCIÓN.	iii
----------------------	------------

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS

1 Introducción	1
2 Riesgos de la electricidad	2
2.1 . Choque eléctrico y sus efectos fisiológicos.	3
2.1.1 Impedancia del Cuerpo Humano.	7
2.1.2 Frecuencia.	8
2.1.3 . Tiempo de exposición a un choque eléctrico.	9
2.1.4 . Trayecto que sigue la corriente.	11
2.2 Quemaduras.	13
3 Medidas de seguridad	15
3.1 Seguridad en las mediciones eléctricas.	15
3.2 Categorías de medición según la norma IEC61010.	20
4 Medición de diferencias de potencial.	22
4.1 Señales referidas y no referidas a tierra.	22
4.2 Medición de señales no referidas a tierra.	29
5 Punta de prueba activa diferencial.	31

CAPÍTULO 2

DISEÑO DE UNA PUNTA DE PRUEBA ACTIVA DIFERENCIAL

1 Introducción	33
2 Estructura de una punta de prueba activa diferencial.	33
2.1 Puntas de conexión	34
2.2 Red de atenuación fija.	35
2.3 Amplificador diferencial	37
2.4 Filtro paso bajas.	45
2.5 Salida con referencia a tierra.	46
3 Diseño	46
3.1 Especificaciones de diseño	46
3.1.1 Planeación.	47
3.1.2 Amplificador Diferencial	48
3.1.3 . Filtro paso bajas	52
3.1.4 . Salida con referencia a tierra	53
3.2 Lista de material y diagrama final	54
3.3 Circuito impreso	55
4 Simulación	57

CAPÍTULO 3

IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE UNA PUNTA DE PRUEBA ACTIVA DIFERENCIAL

1 Introducción	61
2 Evaluación de costos	61
3 Ensamble	63
3.1 Herramienta y equipo necesario	64
3.2 Grabado del circuito impreso	65
3.2.1 Procedimiento para transferir y grabar el diseño en la placa fenólica.	65
3.3 Armado	68
4 Pruebas	69

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

APÉNDICES.

Apéndice A.

BIBLIOGRAFÍA.

INTRODUCCIÓN.

La medición de señales flotantes es necesaria en los siguientes casos: cuando se trabaja con señales no referidas a tierra y/o cuando la conexión del instrumento de medición cause corrientes de tierra (ABCs of Probes Primer. 2005). Las áreas de electrónica de potencia, la cual tiene los requerimiento más demandantes en la medición de señales flotantes (Fundamentals of Floating Measurements 2005); comunicaciones e instrumentación son las que presentan con mayor frecuencia estos casos. Así cualquier persona que se encuentre desarrollando un proyecto en dichas áreas necesitará los instrumentos adecuados para realizar la medición y conservar la integridad, tanto del usuario, de la señal y del equipo de medición.

Particularmente en las materias relacionadas con la electrónica de potencia de la carrera de ingeniería eléctrica electrónica de la Facultad de Ingeniería los alumnos requieren realizar mediciones flotantes, pero carecen del equipo adecuado para realizarlas de forma segura de modo que no expongan su vida, al equipo de medición o a las instalaciones .

Los métodos de medición no se exponen claramente dentro de las aulas y si llegan a ser explicados, es alguno de los dos más comunes e históricamente utilizados; cuyo principio es la flotación del equipo de medición (Fundamentals of Floating Measurements 2005), una práctica poco segura que además de no garantizar la integridad de la medición pone al alumno en riesgo de choque eléctrico. La falta de entendimiento sobre los temas de seguridad en las mediciones eléctricas y medición de señales flotantes es la causa de inseguridad, equipo dañado, mediciones incorrectas, cortos circuitos, y en ocasiones la muerte. Resulta pues, de vital importancia que el alumno aprenda a realizar las mediciones de forma adecuada ya que en su vida profesional puede enfrentarse a este tipo de mediciones y si aplica métodos poco seguros y no recomendados pondrá en riesgo su vida.

No debe olvidarse que la seguridad es una responsabilidad compartida y así como en la industria los operadores y empleadores comparten la responsabilidad de cumplir con los principios de seguridad, a través del correcto uso y aplicación de los métodos de medición. (Floating Oscilloscope Measurements ...1998) En la academia los profesores y alumnos lo hacen también.

El trabajo de tesis documenta los fundamentos de la medición de señales flotantes entre los que se encuentran los relativos a: la seguridad e integridad del usuario, del equipo de medición y de la medición y a los instrumentos y métodos de medición. Los fundamentos se tratan brevemente y únicamente se detalla lo relativo a las puntas de prueba activas diferenciales. La tesis incluye la etapa de diseño, implementación y pruebas de un prototipo de punta de prueba activa diferencial que permite a los alumnos de carreras afines a la electricidad y electrónica construir su propio instrumento de medición.

CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS.

1 Introducción

En este capítulo se tratarán los fundamentos de seguridad y de procedimientos necesarios para trabajar con la energía eléctrica de manera segura. El capítulo busca explicar las causas que originan situaciones de riesgo al trabajar en un laboratorio de pruebas y medición y pone especial énfasis en el entendimiento de la amenaza número uno al trabajar con electricidad, el choque eléctrico. Entender éste último resulta importante ya que si se conocen las causas que lo ocasionan se pueden diseñar métodos y equipos que nos permitan proteger nuestra vida.

La sección 2 explica los riesgos de la electricidad, se describe a detalle qué es un choque eléctrico y las causas que lo originan, y las causas de las quemaduras eléctricas, de contacto térmico y por explosión de arco. Una vez que se han comprendido estos riesgos es necesario pensar en las medidas de seguridad y aplicar las normas para proteger tanto a las personas como al equipo, tema que se desarrolla para el caso de las mediciones eléctricas utilizando el modelo de tres etapas propuesto por la *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) de los Estados Unidos en la sección 3.

La sección 4 fundamenta un concepto clave en la medición eléctrica, la diferencia de potencial y da una breve exposición sobre los instrumentos normalmente utilizados para realizar la medición de ésta. En este capítulo se descubre una limitación del osciloscopio tradicional. Lo que ha llevado a poner en práctica métodos de medición poco seguros y erróneos.

En la última sección de este capítulo se exponen los conceptos fundamentales sobre señales no referidas a tierra, y los métodos de medición utilizados para medirlas. También se propone el uso de una punta de prueba activa diferencial para realizar la medición de señales no referidas a tierra como un método seguro que ayuda a que la integridad física del usuario, del equipo y de la señal medida se conserven en buen estado.

2 Riesgos de la electricidad

En la vida actual la electricidad es indispensable para realizar muchas de nuestras actividades, la encontramos en los hogares y en los sitios de trabajo. En vista de que es una fuente de energía que se utiliza cotidianamente es común que las personas disminuyan las medidas de seguridad al utilizarla y no piensen en los riesgos que puede traer consigo.

Las personas que se dedican de manera profesional o técnica al campo de la electricidad y la electrónica, ya sea en un taller, un laboratorio o en la industria, se encuentran más expuestos a sufrir accidentes eléctricos por la naturaleza de su trabajo y es de vital importancia que conozcan y respeten los procedimientos y medidas básicas de seguridad eléctrica.

Según las estadísticas de mortalidad del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) en México mueren de una a dos personas diariamente por accidentes relacionados con la electricidad, ocupando el décimo cuarto lugar de las razones de muerte en nuestro país. En promedio se presentan 530 muertes al año relacionadas con la electricidad según datos de 1998 hasta 2004 y no se observa una disminución al paso del tiempo (2006); Lo cual significa que no se han adoptado medidas de prevención y de capacitación al respecto del manejo de la energía eléctrica.

El choque eléctrico es el riesgo fundamental de la electricidad, de él se derivan otros, como son: quemaduras, caídas y la electrocución (muerte debida a un choque eléctrico). (Electrical Safety... 2002), por ello es importante conocer las causas que dan lugar a que se sufra un choque eléctrico y los efectos de éste sobre el cuerpo humano.

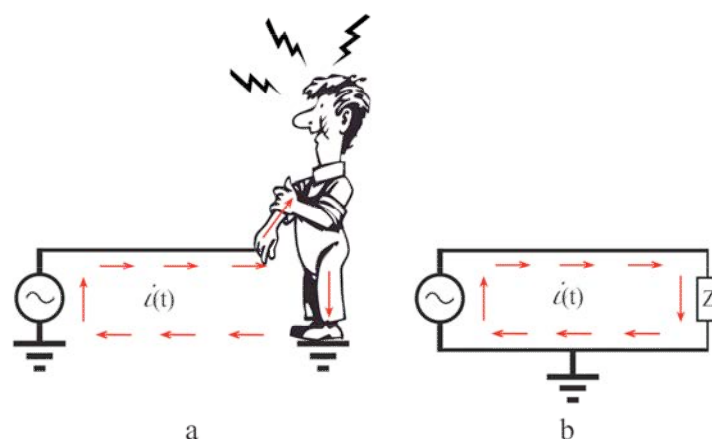
2.1. Choque eléctrico y sus efectos fisiológicos.

Un choque eléctrico tiene lugar cuando la corriente eléctrica circula a través del cuerpo de un ser vivo y produce una reacción fisiológica anormal a su funcionamiento (Aston, 1990). En el caso de las actividades del ser humano, este escenario se puede presentar en diferentes lugares y de diversas formas, sin embargo, todas se resumen a un circuito eléctrico que se cierra a través del cuerpo.

En la Figura 1-1a se ve a una persona que entra en contacto con un conductor que tiene un potencial sobre tierra, cuando esto sucede el cuerpo proporciona un camino de retorno a tierra para la corriente y bajo estas condiciones se tiene un escenario en el que es posible sufrir un choque eléctrico. El conductor de la ilustración simboliza cualquier parte de un circuito eléctrico o electrónico que se encuentre a un potencial de corriente directa o alterna mayor que el de tierra, debido a esto la Figura 1-1a representa el caso general de una situación de riesgo de choque eléctrico. Debe tenerse en cuenta que el contacto de la persona con el circuito no siempre es de manos a pies, este puede ser de mano a mano, de cabeza a pies, de pie a pie, etc...

Figura 1-1

a) Persona en posible estado de choque eléctrico. b) Circuito equivalente.



Fuente: Elaboración propia.

Hasta ahora se ha hablado de un escenario en el que es posible sufrir un choque eléctrico, para que podamos asegurar que la persona se encuentra en estado de choque es necesario que la intensidad de corriente que circule a través de su cuerpo sea de magnitud suficiente para ocasionar una reacción fisiológica que no sea normal al funcionamiento del cuerpo humano. En el año de 1961 el profesor de ingeniería eléctrica Charles F. Dalziel de la Universidad de California realizó uno de los estudios más completos sobre los efectos deletéreos del choque eléctrico, en su estudio entre otras cosas se determinaron los umbrales de intensidad de corriente, cuando circula de una mano a la otra, necesarios para producir diferentes reacciones fisiológicas, sus resultados suelen resumirse en una tabla como la mostrada en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1

Efectos fisiológicos en el cuerpo humano para diferentes intensidades de corriente.

Intensidad de corriente	Intensidad de corriente
1 mA	Ligero cosquilleo.
5 mA	Choque no doloroso. La mayor parte de las personas pueden soltarse, sin embargo, produce movimientos involuntarios que pueden causar lesiones.
6 – 25 mA (mujeres) 9 – 30 mA (hombres)	Choque doloroso. Se pierde el control muscular y es posible que la persona no pueda soltarse.
50-150 mA	Choque extremadamente doloroso, paro respiratorio, contracciones musculares severas. Puede causar la muerte.
1 – 4.3 A	Fibrilación ventricular. Daño al sistema nervioso. La muerte es común.
10 A	Paro cardiaco y quemaduras severas. Muerte casi segura.
*Efectos de diferentes intensidades de corriente de mano a mano, a tensiones menores de 600 V C.A y aplicadas durante 1 s.	

Fuente: Electrical Safety 2002.

Para poder determinar el estado de choque es necesario calcular la intensidad de corriente en el circuito, en la Figura 1-1b se muestra un circuito equivalente en el que el cuerpo de la persona es sustituido por su impedancia (Z), de esta manera podemos calcular la intensidad de corriente en el circuito utilizando la ley de Ohm generalizada:

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{|Z|} [A]$$

Ec. 1-1

Donde:

I_{rms} es la intensidad de corriente que circula a través del cuerpo.

V_{rms} es la tensión aplicada al cuerpo.

$|Z|$ es la magnitud de la impedancia del cuerpo.

Según los umbrales de la Tabla 1-1 si la intensidad de corriente I_{rms} es al menos de 1 mA y circula de mano a mano entonces podemos asegurar que la persona se encuentra en estado de choque. Debe tenerse cuidado con los datos de la Tabla 1-1 ya que suele presentarse en muchas fuentes bibliográficas sin hacer notar que los umbrales son para corrientes que siguen un trayecto de mano a mano a tensiones menores de 600 V C.A., aplicadas durante 1 s y sin lesiones en la piel. Los umbrales en otras circunstancias cambian por ejemplo si en el caso anterior en vez de corriente alterna se utilizara una fuente de corriente directa el umbral de sensación subiría a 5 mA o si se hace circular una corriente en la punta de la lengua el umbral de sensación sería tan sólo de ¡45 μ A! (Dalziel, 1961).

En el caso de aplicaciones a la biomedicina se ha observado que si existe contacto directo con la superficie del corazón a través de un catéter un pulso de corriente de 10 μ A es suficiente para ocasionar fibrilación ventricular o paro cardiaco.

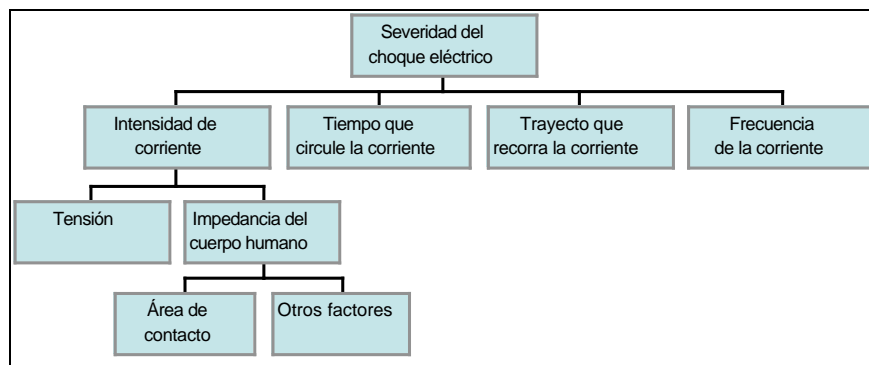
Esta diferencia en los niveles de intensidad de corriente da lugar a una clasificación del choque eléctrico en:

- Macro choque: Respuesta fisiológica no deseada que se produce por una corriente que circula en la superficie del cuerpo.
- Micro choque: Respuesta fisiológica no deseada que se produce por una corriente que circula en la superficie de los órganos internos (Aston, 1990).

Es importante resaltar que circuitos de baja tensión no significan ausencia de peligro, debe observarse en la ecuación 1-1 que incluso con baja tensión se pueden producir corrientes de magnitud suficiente para ocasionar un choque eléctrico, todo depende de la impedancia del cuerpo humano.

Como se ha visto hasta ahora, existen diferentes factores que determinarán la severidad de un choque eléctrico. De la ecuación 1-1 sabemos que la intensidad de corriente, la tensión y la impedancia del cuerpo humano son factores determinantes, de los estudios del profesor Dalziel observamos que la frecuencia, el tiempo y el trayecto también lo son. Todos ellos se resumen en el cuadro de la Figura 1-2.

Figura 1-2
Factores que determinan la severidad de un choque eléctrico.



Fuente: Elaboración propia.

En esta sección ya se ha hablado sobre la intensidad de corriente y los umbrales establecidos para los macro y micro choques; En las subsecciones siguientes se tratarán de manera particular el resto de los factores que influyen en la gravedad de un choque eléctrico.

2.1.1 Impedancia del Cuerpo Humano.

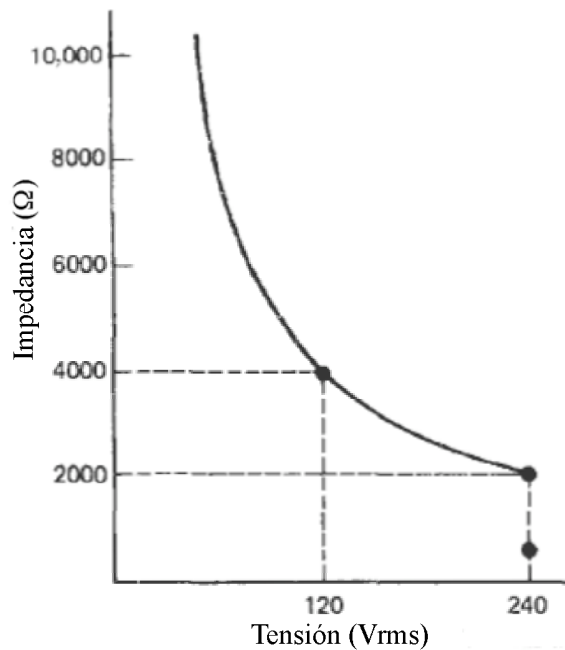
La piel es el órgano más grande del cuerpo humano y se compone de dos capas: la dermis y la epidermis. La epidermis es la capa externa de la piel y es la que nos protege de agentes externos, incluyendo la electricidad. A través de diferentes experimentos se ha determinado que la impedancia de la piel tiene una componente capacitiva (García Márquez 1999). En general, la impedancia que presente el cuerpo dependerá de la resistividad de la piel, del trayecto que siga la corriente y del área de contacto. Los valores de impedancia de la piel seca, medida de mano a mano para baja tensión, se encuentran entre 10,000 y 100,000 Ω pudiendo ser mayor si la piel es callosa. Sin embargo, cuando ésta se encuentra húmeda su impedancia puede disminuir a unos 1,000 Ω o menos.

Una condición de peor caso involucra el rompimiento de la epidermis dejando la capa interna de la piel (la dermis) expuesta. El valor óhmico de mano a mano con la dermis expuesta normalmente es menor a 1,000 Ω y la posibilidad de recibir un choque de gravedad aumenta.

La tensión a la que se ve sometida la piel es también un factor que determina su impedancia. En la Figura 1-3 se muestra el comportamiento de la impedancia de la piel medida de mano a mano para diferentes niveles de tensión. Se observa que a medida que la tensión aumenta la impedancia disminuye, de ahí que el trabajar con media y alta tensión constituye un riesgo mayor de choque eléctrico (Towle, 2003).

Figura 1-3

Impedancia aparente de mano a mano con la piel seca en función de la tensión aplicada.



Fuente: Towle, 2003.

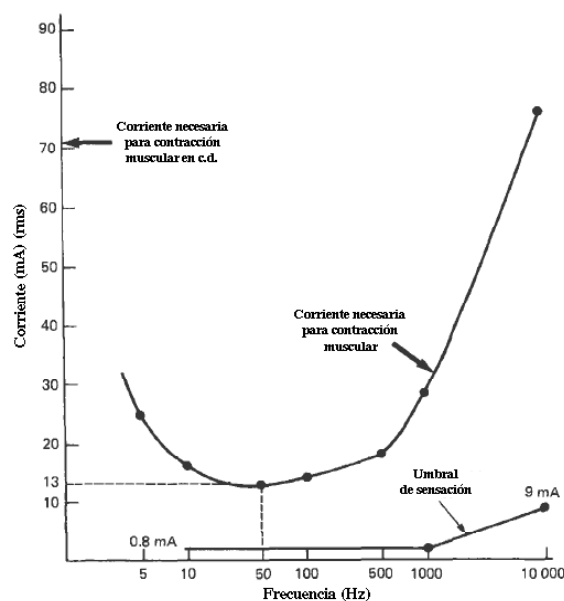
2.1.2 Frecuencia.

La frecuencia también juega un papel importante para determinar la gravedad del choque. Cuando una corriente eléctrica circula a través del cuerpo es posible que ocurra la contracción muscular lo cual puede ser un efecto grave ya que si la persona cierra el circuito eléctrico con las manos y ésta se encuentra tomando un conductor al ocurrir la contracción muscular la persona no será capaz de soltarse, y aumentará el tiempo que la corriente circula por él, de modo que el riesgo de muerte aumenta. La contracción muscular es un proceso fascinante, éste involucra un pulso de señal eléctrica que libera un químico que causa movimiento mecánico. Las corrientes requeridas son del orden de 15 mA y para mantener un músculo contraído se requieren cerca de 10 pulsos por segundo.

Cuando se aplica corriente directa puede ocasionar que el músculo se contraiga una vez y después se relaje. Consecuentemente la corriente directa tiende a ser más segura. Sin embargo, a una diferencia de potencial mayor la corriente directa puede ocasionar parálisis, ya que la variación de la resistencia del cuerpo debida a quemaduras y otros factores causan que exista una fluctuación en la corriente y contraiga los músculos. En la Figura 1-4 se muestran los umbrales de corriente de sensibilidad y contracción muscular, debe notarse que los 50 y 60 Hz que se utilizan en los sistemas eléctricos de los hogares e industrias son particularmente aptos para ocasionar contracción muscular (Towle, 2003).

Figura 1-4

Gráficas para el umbral de sensación y de corriente necesaria para producir contracción muscular en función de la frecuencia.



Fuente: Towle, 2003.

2.1.3. Tiempo de exposición a un choque eléctrico.

El tiempo que una persona permanezca en estado de choque es un factor de vital importancia, ya que dependiendo de éste la persona podría entrar en un estado de fibrilación ventricular¹ y perder la vida.

¹Se refiere a la condición en la cual los ventrículos del corazón se contraen rápidamente y sin sincronismo

El profesor Dalziel, C. F. (1961) determinó la relación entre la intensidad de corriente y el tiempo necesario para que dicha corriente ocasione fibrilación ventricular, las relaciones que encontró son para personas de 50 y 70 kg y son las siguientes:

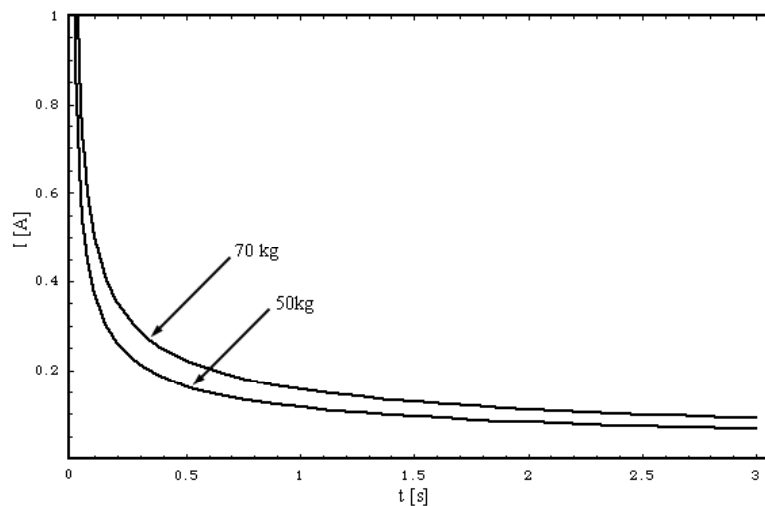
$$I_{50kg} = \frac{0.116}{\sqrt{t}} \text{ [A]} \quad \text{Ec. 1-2}$$

$$I_{70kg} = \frac{0.157}{\sqrt{t}} \text{ [A]} \quad \text{Ec. 1-3}$$

Si se grafican las ecuaciones anteriores se obtienen las gráficas para el umbral de fibrilación ventricular como se muestra en la Figura 1-5.

Figura 1-5

Gráficas para el umbral de fibrilación ventricular para personas de 50 y 70 kg.



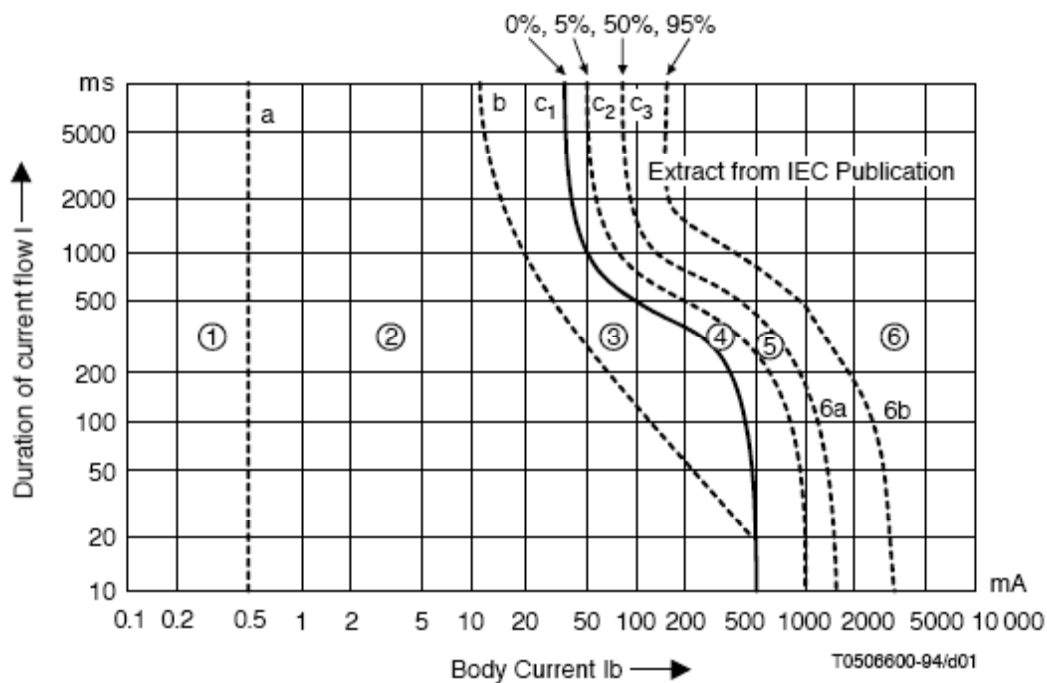
Existen otras curvas que relacionan el tiempo de exposición a un choque eléctrico con el umbral de fibrilación ventricular denominadas curvas S o gráficas Bigelmeier, éstas se muestran en la Figura 1-6.

lo que ocasiona que no se bombee sangre al cuerpo.

La diferencia entre éstas y las del profesor Dalziel es que Bigelmeier no considera el peso de la persona, y por lo tanto se dice que las gráficas de Dalziel son más precisas.

Figura 1-6

Gráficas de Bigelmeier para umbrales de fibrilación ventricular. (Trayectoria de mano izquierda a pies).



Fuente: Limits for people safety, 1997

2.1.4. Trayecto que sigue la corriente.

El camino que siga la corriente a través del cuerpo también determina la severidad de las heridas que le causa. Cuando circula una corriente a través del cuerpo ésta se distribuye y por lo tanto se puede obtener una densidad de corriente en alguna zona específica, así el trayecto determinará las zonas en las que ocurre la distribución de la corriente y la afectación de órganos.

Como se ha visto, los umbrales de efectos fisiológicos, el comportamiento de la impedancia de la piel y los umbrales de fibrilación ventricular se dan para corrientes que circulan de mano a mano o de las manos a los pies. Ya que uno de los órganos en los que es vital conocer la densidad de corriente que circulará a través de él es el corazón, se definió un factor denominado factor de corriente del corazón (F), este factor representa la relación entre la densidad de corriente en el corazón para la trayectoria considerada (ej. mano izquierda a pecho) y la densidad de corriente en el corazón de la trayectoria tipo, que es de mano izquierda a pies. En la Tabla 1-2 se muestran los diferentes valores para el factor de corriente del corazón. Como muestran los datos, la trayectoria de mayor riesgo es de la mano izquierda al pecho, hecho que no debe sorprender considerando que el corazón se encuentra del lado izquierdo.

Tabla 1-2

Factor de corriente del corazón en función de la trayectoria de la corriente.

Trayectoria de la corriente	Factor de corriente del corazón. (F)
Mano Izquierda a pie izquierdo, derecho o pies	1
Manos a pies	1
Mano derecha a mano izquierda	0.4
Mano derecha a uno, otro o ambos pies	0.8
Mano derecha a espalda	0.3
Mano izquierda a espalda	0.7
Mano derecha a pecho	1.3
Mano izquierda a pecho	1.5
Mano a glúteos	0.7
Entre pies	0

Fuente: García,1999

La Tabla 1-2 nos ayuda a determinar la cantidad de corriente (I_x) que se necesita en una trayectoria dada, para tener la misma densidad de corriente en el corazón que se tiene al aplicar una corriente (I_{ref}) que sigue la trayectoria tipo. La relación entre las corrientes está dada por la ecuación 1-4.

$$I_x = \frac{I_{ref}}{F}$$

Ec. 1-4

Ejemplo.

Una corriente de 100 mA se aplica entre la mano izquierda y los pies. ¿Cuál es la magnitud de la corriente necesaria para tener la misma densidad de corriente en el corazón si la trayectoria es de mano izquierda a pecho?

Solución.

Sustituyendo en la ecuación 1-4 y utilizando los datos de la Tabla 1-2 se tiene:

$$I_x = \frac{100}{1.5} = 66.66 \text{ mA}$$

Si la corriente sigue una trayectoria que no incluya al corazón, como por ejemplo entre los pies, debe tenerse en mente que puede causar daños ocultos al cuerpo, ya que puede ocasionar sangrados internos, destrucción de los tejidos, nervios y músculos. Por ello es importante que si se sufre un choque eléctrico no importando la trayectoria de éste se realicen estudios médicos a fin de determinar si hay o no daños internos, ya que en ocasiones las lesiones ocultas conllevan a una muerte lenta.

2.2 Quemaduras.

Las quemaduras ocasionadas por el paso de la corriente eléctrica reciben el nombre de quemaduras eléctricas y son lesiones ocasionadas por efecto Joule. Los factores principales que las ocasionan son la tensión, la intensidad de corriente y el tiempo que la persona permanezca en estado de choque. Recordemos que la potencia promedio está dada por:

$$P_{ave} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt \text{ [W]} \quad \text{Ec. 1-5}$$

Si nuestro cuerpo no es capaz de disipar la potencia promedio, se calentará por efecto Joule hasta sufrir quemaduras, las cuales pueden ir desde el primer hasta el tercer grado. Este tipo de quemaduras es muy grave ya que en ocasiones genera daños internos en el cuerpo difíciles de sanar y la recuperación puede ser muy lenta.

Existen otras dos formas en las que una persona puede sufrir quemaduras debido a la corriente eléctrica, por ejemplo, cuando un componente en funcionamiento eleva su temperatura y alguien entra en contacto con él puede sufrirse una quemadura denominada quemadura por contacto térmico, está también puede tener lugar si una persona al entrar en contacto con la electricidad su ropa se incendia.

El tercer tipo de quemadura ocasionada por la electricidad es lo que se conoce como una explosión de arco o *arc-blast*. Esta explosión tiene lugar cuando una falla eléctrica de fase a tierra o entre fases en un circuito de alta energía² genera un arco eléctrico y ocasiona que el aire a su alrededor se ionice y favorezca la conducción eléctrica haciendo que la falla sea aún más severa, entonces se presenta un aumento en la temperatura del ambiente, se han registrado temperaturas hasta de 35,000 F (19,426 °C), y ocasiona una explosión de gran peligro ya que no sólo se sufren quemaduras por contacto térmico, sino que también se recibe un gran golpe por parte de la onda expansiva y los equipos de cobre o aluminio cercanos al lugar donde se originó la explosión de arco se funden y salen disparados como balas lo cual ocasiona lesiones físicas graves o la muerte (Electrical Safety, 2002).

² Un circuito de alta energía es aquel que es capaz de transportar una gran intensidad de corriente.

3 Medidas de seguridad

3.1 Seguridad en las mediciones eléctricas.

Una manera de procurar la seguridad es utilizar el modelo de tres etapas: reconocer, evaluar y controlar, propuesto por la *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) de los Estados Unidos.

La primera etapa consiste en reconocer los riesgos que están presentes en el lugar en que realizaremos una actividad, en esta etapa no importa si el peligro de un riesgo es alto o bajo. No debe subestimarse ningún riesgo ya que nuestra vida y la de nuestros compañeros depende de una planeación de riesgos adecuada. La identificación de riesgos es un trabajo en equipo, ya que es posible que una persona note uno que otra no. En esta etapa se proponen también medidas de prevención como son: el equipo de protección personal, utilizar cerraduras o candados en los interruptores principales y etiquetas que alerten sobre el riesgo y el uso de los equipos.

Una vez que se tienen identificados los riesgos es necesario evaluar el peligro de cada uno de ellos según la actividad que vayamos a realizar, de modo que las medidas de prevención se apliquen adecuadamente y en caso de ser necesario se realicen las correcciones necesarias para suprimir o disminuir el peligro.

La tercera etapa tiene que ver con el control, y es en esta etapa donde las acciones de prevención tienen lugar. Una vez identificados y evaluados los riesgos se debe saber qué hacer para evitarlos y protegerse de ellos en caso de que se presenten. La etapa de control tiene por objetivo aplicar métodos de trabajo seguro, elementos de protección ya sea en el equipo personal de trabajo o en el equipo e instalaciones físicas.

Si se siguen las tres etapas del modelo se creará un ambiente seguro de trabajo en el que el riesgo de sufrir alguna lesión grave o muerte se ve disminuido. (Electrical Safety.2002)

A continuación se aplicará el modelo de tres etapas para analizar y proponer medidas de seguridad cuando se realizan mediciones eléctricas en un laboratorio dedicado a la electrónica.

Reconocimiento de Riesgos.

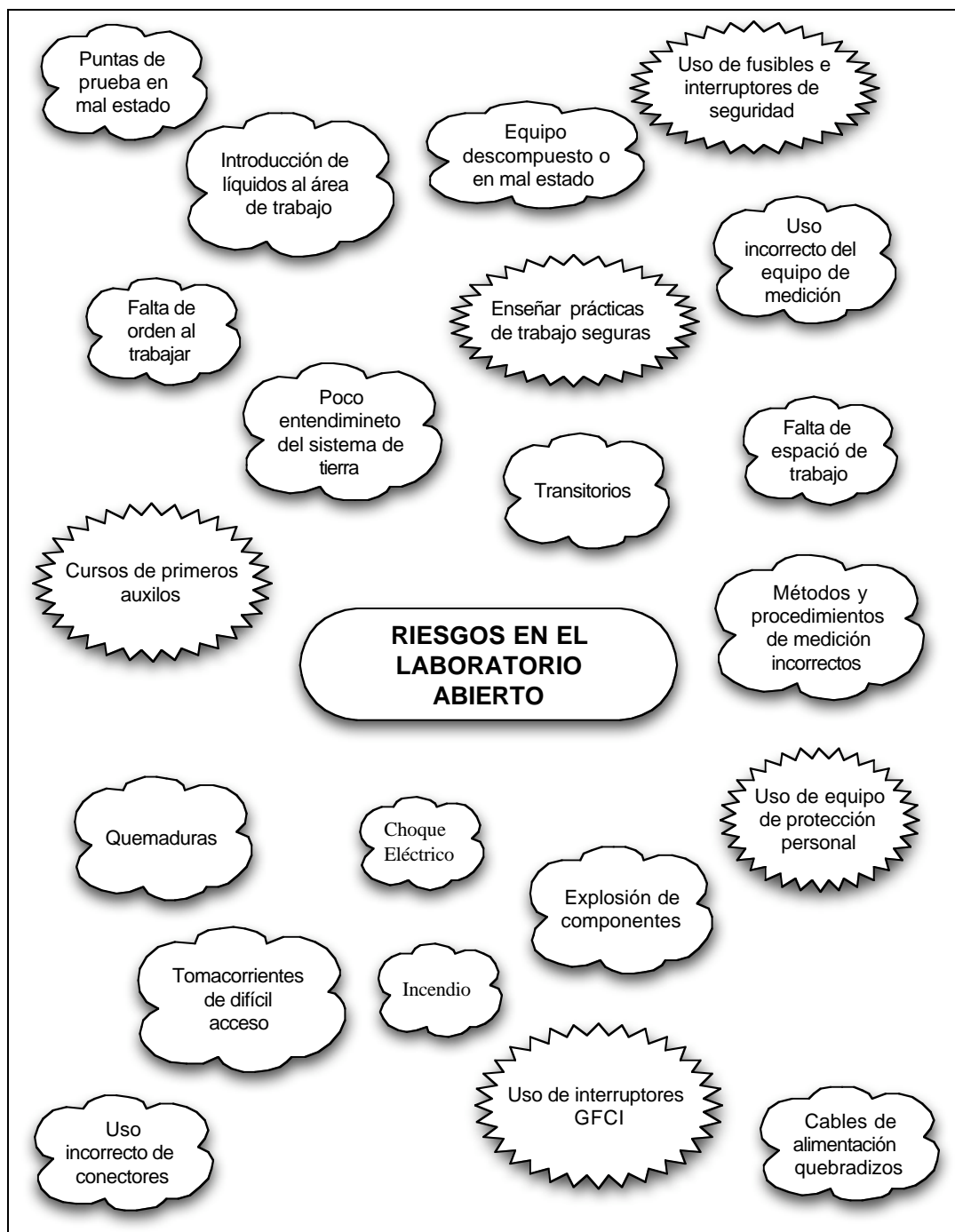
Para poder realizar el reconocimiento de riesgos es necesario ubicarse y observar atentamente el lugar de trabajo, en el caso de este ejemplo el laboratorio abierto de electrónica de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M.. De preferencia debe asistir un grupo de personas de modo que a través de una lluvia de ideas se consideren la mayor cantidad de riesgos presentes en el lugar. Así mismo, las observaciones deben realizarse de modo que se considere la dinámica del lugar y no se excluya ninguna amenaza.

Al mismo tiempo que se realizan las observaciones deben proponerse posibles medidas de prevención de riesgo. En la Figura 1-7 se muestra la lluvia de ideas realizada para el ejemplo.

De las ideas presentadas no todas corresponden a riesgos involucrados en las mediciones eléctricas, sin embargo son bienvenidas ya que contribuyen a establecer un procedimiento de trabajo seguro. También se observan algunas propuestas de medidas de prevención.

Figura 1-7

Lluvia de ideas para reconocer riesgos en el laboratorio abierto.



Fuente: Elaboración Propia.

Evaluación de Riesgos.

Debido a que la actividad de interés son las mediciones eléctricas, se clasificarán los riesgos detectados en la lluvia de ideas utilizando la clasificación de riesgos eléctricos que recomienda la OSHA (Electrical Safety. 2002).

Riesgos Eléctricos

Aislamiento Defectuoso
Cables de alimentación quebradizos
Puntas de prueba en mal estado

Conexión a tierra inadecuada
Falta de la pata de conexión a tierra en el cable de alimentación de los equipos
Flotar los equipos para realizar mediciones

Partes eléctricas expuestas
Circuitos en prueba
Cables de alimentación fuera del chasis
Uso inadecuado de conectores

Protecciones inadecuadas para sobre cargas y sobre corrientes
Fusibles
Interruptores termomagnéticos

Condiciones Húmedas
Introducción de bebidas y alimentos al área de trabajo

Instrumento dañado
Uso inadecuado del equipo
Operación incorrecta de los equipos

Otros
Espacio de trabajo inadecuado
Limpieza del espacio de trabajo inadecuada
Explosión de componentes

Medidas de Prevención

Capacitación
Cursos de primeros auxilios
Enseñanza de prácticas seguras de trabajo

Equipo de Seguridad
Equipo de protección personal
Interruptores de falla a tierra
Fusibles e interruptores termomagnéticos

Experiencias reales.

Protecciones inadecuadas para sobre cargas y sobre corrientes.

En una ocasión unos compañeros se encontraban probando un circuito de electrónica de potencia, el cable de alimentación del circuito contaba con un fusible a fin de evitar una sobre corriente, entonces los compañeros decidieron realizar la primer prueba de su circuito y fundieron el último fusible en su caja de herramientas, a falta de fusible uno de ellos propuso sustituir el fusible por un pedazo de alambre calibre 22 AWG. Ante tal proposición expresé que no era correcto y que podría ser peligroso, aún con la advertencia de su compañero de equipo y la mía, el compañero decidió aventurarse a probar su circuito con el pedazo de alambre como fusible, al momento de energizar el circuito hubo una explosión que fundió el porta fusible dejándolo soldado con el pedazo de cable fundido en su interior. Afortunadamente el incidente no tuvo consecuencias graves, sin embargo debe recordarse que los fusibles siempre deben ser bien elegidos y calculados para que realicen su función adecuadamente.

En algún semestre, el fusible del regulador que alimenta al laboratorio abierto se fundió, como no se tenía disponible el fusible el laboratorio quedó cerrado un par de semanas, sin embargo era necesario el servicio y el fusible no llegaba así que el fusible del regulador se sustituyó por un pedazo de alambre. Eso constituye un riesgo ya que si se repetía la situación por la que originalmente se fundió el fusible se podría tener una situación peligrosa cuyo costo de reparación podría ser invaluable.

Control de Riesgos.

Con los riesgos identificados se deben tomar acciones para prevenirlos. En este caso se pueden aplicar diferentes acciones como son:

1. Formación de una cultura de la seguridad en los alumnos.
2. Uso obligatorio de equipo de protección personal en el laboratorio.
3. Entendimiento de los sistemas de protección eléctrica.
4. Mejoras en distribución de los equipos de trabajo y número de ocupantes por equipo.

Como se mencionó en la introducción del presente trabajo, la seguridad es una responsabilidad compartida entre profesores y alumnos, por tanto la educación sobre métodos de trabajo seguro constituye la acción de control más importante ya que nos enseña a pensar siempre en base a la seguridad.

3.2 Categorías de medición según la norma IEC61010.

La norma internacional: IEC61010-1 Requisitos de seguridad de equipos eléctricos de medida, control y uso en laboratorio. Parte 1: Requisitos generales. Establece una clasificación en categorías denominadas categoría de medición CAT. Existen cuatro niveles. Entre más cercanos nos encontremos de fuentes de alta energía la categoría será mayor. En la Tabla 1-3 se muestra la categoría con una descripción y ejemplos de qué actividades le corresponden a cada una.

Experiencias reales.

Aislamiento defectuoso e Instrumento dañado.

En una ocasión me encontraba con un buen amigo en el laboratorio abierto probando y depurando un circuito acondicionador de señal para un LVDT que armamos para la materia de Medición e Instrumentación. Mientras depurábamos el circuito notamos que un componente estaba soldado en el lugar equivocado y era necesario desoldarlo, tan equipados como siempre, no llevábamos nuestro caudín así que solicitamos nos prestaran el del laboratorio abierto, yo no realicé la inspección del mismo y conecté el caudín a la línea sin más ni más, el LVDT estaba desenergizado, las bobinas que lo conforman se encontraban expuestas y el núcleo estaba en el interior del mismo, de pronto al mover el cable del caudín sale una gran chispa de color azul me hice para atrás un poco asustado, después voltee a ver a mi amigo y me di cuenta que tenía el núcleo entre sus manos al nivel del pecho, resulta que el núcleo salió disparado hacia él porque el cable de alimentación del caudín tenía el aislamiento defectuoso y al mover el cable hizo contacto con las puntas de conexión de las bobinas del LVDT. Afortunadamente la aceleración del núcleo no fue tal que lo convirtiera en una flecha y provocara una lesión a mi amigo. La inspección del equipo siempre debe realizarse.

Tabla 1-3
Categorías de medición.

La norma IEC 61010 rige para equipos de comprobación de baja tensión (< 1000 V).

Categoría de medición.	Descripción breve.	Ejemplos.
CAT IV	Tres fases en la conexión del servicio de energía eléctrica, cualquier conductor externo.	<ul style="list-style-type: none"> • Se refiere a "origen de la instalación"; es decir, en dónde se efectúa la conexión de baja tensión a la alimentación del servicio de energía eléctrica. • Medidores de consumo de electricidad, equipos de protección contra sobre corrientes. • Exterior y entrada del servicio, acometida del servicio desde el poste al edificio, recorrido entre el medidor y el panel. • Línea en altura a edificio separado, línea subterránea a bomba de pozo.
CAT III	Distribución trifásica incluyendo iluminación comercial monofásica.	<ul style="list-style-type: none"> • Equipos en instalaciones fijas, tales como equipos de conmutación y distribución y motores polifásicos. • Bus y alimentador en plantas industriales. • Alimentadores y circuitos de derivación corta, dispositivos de paneles de distribución. • Sistemas de iluminación en edificios grandes. • Salidas para aparatos con conexiones cortas a la entrada del servicio.
CAT II	Cargas conectadas a tomacorrientes monofásicos.	<ul style="list-style-type: none"> • Artefactos, herramientas portátiles y otras cargas domiciliarias y similares. • Tomacorrientes y circuitos de derivación larga. • Salidas a más de 10 metros (30 pies) de fuente CAT III. • Salidas a más de 20 metros (60 pies) de fuente CAT IV.
CAT I	Electrónicos.	<ul style="list-style-type: none"> • Equipos electrónicos protegidos. • Equipos conectados a circuitos (fuente) en los cuales se toman mediciones para limitar las sobre tensiones transitorias a un nivel adecuadamente bajo. • Cualquier fuente de voltaje alto y baja energía derivada de un transformador de gran resistencia de bobinado, tal como la sección de voltaje alto de una fotocopiadora.

Fuente: El ABC de la Seguridad, 2003.

Es importante reconocer en qué categoría de medición se planea realizar pruebas de modo que se utilice el equipo de protección personal adecuado y el equipo de medición diseñado especialmente para cumplir con la seguridad al utilizarlo en cierta categoría.

4 Medición de diferencias de potencial.

4.1 Señales referidas y no referidas a tierra.

Por definición, la tensión es la medición de la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos. Este concepto se entiende fácilmente al utilizar un voltímetro, ya que no se puede realizar la medición utilizando sólo una de las puntas de prueba; La otra punta debe ser conectada de modo que se cuente con un punto de referencia para realizar la medición. También se puede recurrir a otros instrumentos para medir tensión, por ejemplo a un multímetro portátil, y si se desea ver la forma de onda, a un osciloscopio.

La conexión de los instrumentos al circuito en prueba puede parecer trivial. Ingenuamente se piensa que sólo es necesario conectar la terminal común (la terminal de color negro en la mayoría de los casos) a un punto en el circuito, el cual será el punto de referencia, y la otra terminal a otro y de esta manera observar la diferencia de potencial entre ellos teniendo como única precaución que la escala del instrumento sea suficiente para medir la magnitud de tensión que se presenta en el circuito.

Si se utiliza un multímetro portátil o un voltímetro el procedimiento anterior normalmente no presentará mayor contratiempo, sin embargo si se utiliza un osciloscopio es posible que tengamos problemas para realizar la medición como se verá en la sección de señales no referidas a tierra.

Cuando se va a realizar una medición también deben considerarse los siguientes aspectos del instrumento: características de señal que se desea medir, puntas de prueba adecuadas, rango dinámico suficiente y ancho de banda adecuado, de modo que la conexión del mismo al circuito no afecte su operación, ni se afecte la integridad de la señal (ABCs of Probes Primer, 2005).

Las señales de tensión pueden clasificarse de muchas maneras. En el mundo de la medición es común referirse a señales referidas a tierra y señales flotantes. Otro nombre que reciben las señales flotantes es señales diferenciales, sin embargo no es un nombre muy afortunado ya que en sentido estricto la tensión siempre es una señal diferencial no importando a qué punto esté referida. A continuación se verán las características de cada tipo de señal.

Señales referidas a tierra.

Cuando se mide o se observa una señal no debe olvidarse que no es la señal en un punto de prueba específico, sino la diferencia de potencial entre ese punto y otro que se toma como referencia. Ese otro punto normalmente es la tierra del circuito y se considera que su valor es de cero V. Así:

Una señal referida a tierra es una señal cuyo punto de referencia es la tierra del circuito.

Medir señales referidas a tierra es un procedimiento cotidiano en el área de la electrónica y parece ser un proceso simple de realizar. No hay que olvidar que idealmente un instrumento de medición debe tener: facilidad de conexión, fidelidad absoluta de la señal, cero carga a la fuente de la señal y completa inmunidad al ruido.

No sólo es difícil lograr esas características en la realidad, sino también puede ser impráctico. Por ejemplo, para no cargar la fuente de la señal se requiere que el instrumento tenga impedancia de entrada infinita, esto no puede ser ya que se requiere que el instrumento derive una pequeña corriente a fin de que pueda realizar la medición. También, es deseable que un instrumento tenga ancho de banda infinito, sin embargo esto resulta imposible de conseguir y pudiera ser contraproducente ya que los costos incrementan con el ancho de banda. Es por ello que el sistema de medición debe elegirse para el tipo de medición que se desea realizar.

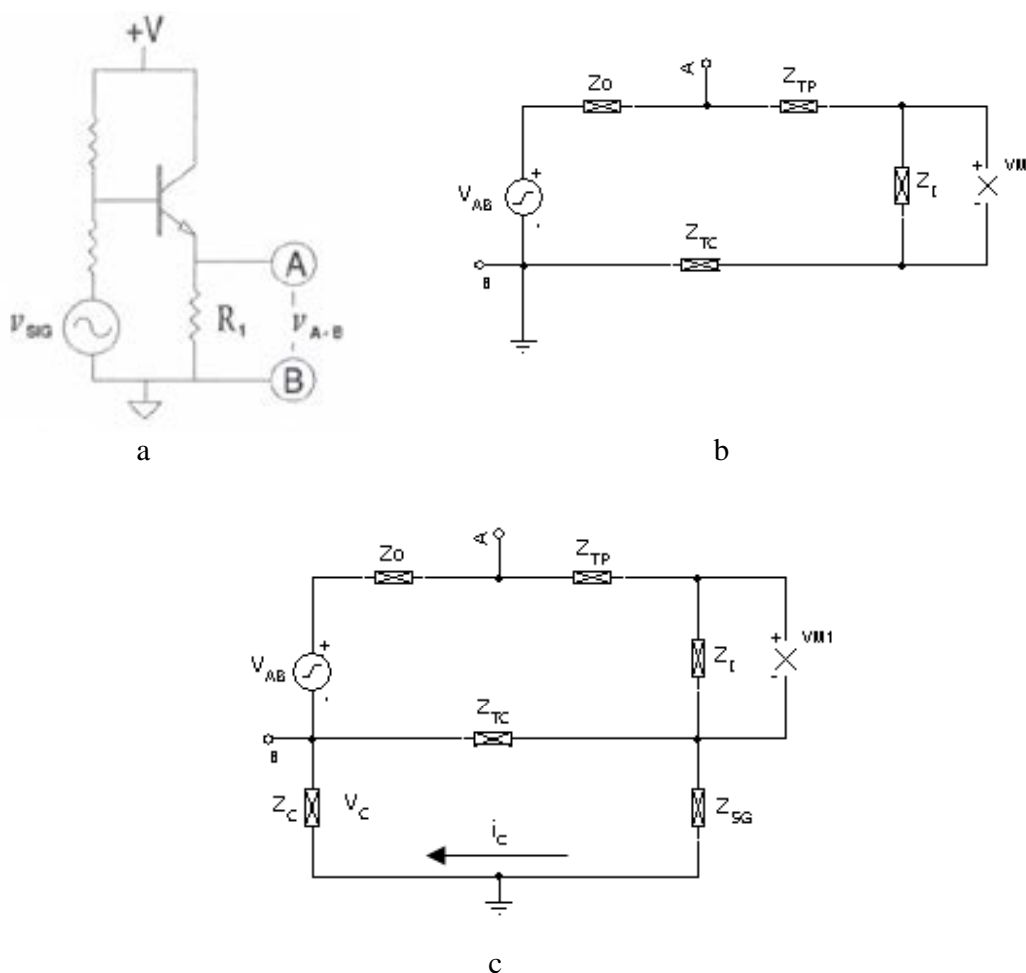
En la Figura 1-8a se muestra un circuito en el que se desea medir una señal referida a tierra en el punto A. En la Figura 1-8b se observa la conexión de un voltímetro de alta impedancia o un multímetro digital para medir la tensión. Estos instrumentos son de conexión fácil, normalmente tienen alta impedancia de entrada por lo que no cargan al circuito, son útiles en señales cuyo ancho de banda es menor a 1 o 2 kHz³ y si se utilizan

³ Existen multímetros profesionales con mayor ancho de banda, sin embargo el de los multímetros utilizados comunmente está entre 1 y 2 kHz.

las puntas de prueba recomendadas por el fabricante la fidelidad e inmunidad al ruido de la señal no se ven significativamente afectadas. En la Figura 1-8c se muestran las conexiones del mismo circuito pero ahora utilizando un osciloscopio de diseño tradicional⁴, y una punta de prueba pasiva (aquella que ocupa sólo componentes pasivos en su construcción), obsérvese lo complejo que se vuelve el circuito. Resulta de interés saber si el circuito que se forma afecta la integridad de la señal y de ser así encontrar soluciones para poder realizar la medición de forma adecuada.

Figura 1-8

Medición de una señal referida a tierra utilizando un multímetro y un osciloscopio.



⁴ El diseño tradicional se refiere a los osciloscopios en los que el chasis y el común de la señal se encuentran aterrizados.

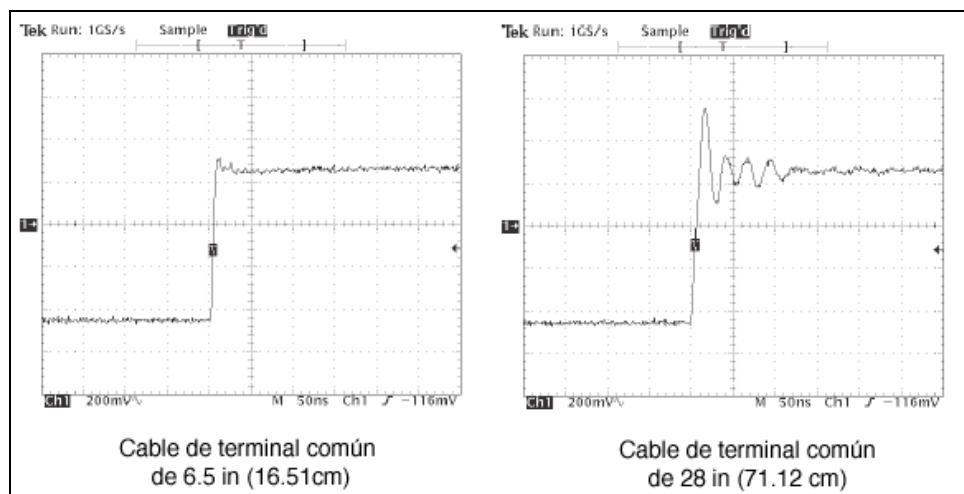
Haciendo referencia a la Figura 1-8c, se notará lo siguiente:

La tensión V_{AB} es la tensión que se desea observar en el osciloscopio. El punto B es la tierra del circuito original y por eso es una señal referida a tierra. Z_O es la impedancia vista entre los puntos A y B. Se tiene una tierra ideal para tener una referencia sólida a cero V. Z_{SG} es la impedancia del cable de puesta a tierra del osciloscopio. Z_c es la impedancia entre el común del circuito en prueba (punto B) y la tierra ideal. i_c es la corriente de tierra y V_c es la tensión debida a i_c y Z_c .

No debe perderse de vista que a pesar de que al conectar el osciloscopio al circuito tenemos una “nueva” tierra, dicha tierra no pertenece al circuito original, el mostrado en la Figura 1-8a, si se observa con atención se apreciará la importancia de la terminal común de la punta de prueba. Para empezar si i_c , Z_c y Z_{SG} fueran cero, podríamos no conectar el común de la señal de la punta de prueba ya que no habría diferencia de potencial entre la tierra del circuito y el común del osciloscopio. Sin embargo como esto no es así se debe buscar una manera de disminuir los efectos de i_c , Z_c y Z_{SG} . Esto se logra gracias a la conexión de la terminal común con la que se busca igualar el potencial de la tierra del circuito original a la de la tierra propia del osciloscopio al cortocircuitar las impedancias Z_c y Z_{SG} . Sin embargo la terminal común de la punta de prueba tiene su propia impedancia Z_{TC} y esto evita que se conserve la integridad de la señal V_{AB} . Así, si la punta de prueba no está compensada se notará que la señal observada en el osciloscopio puede diferir significativamente de la original. La recomendación es mantener la longitud del cable de la terminal común lo más corto posible a fin de disminuir su inductancia. En la Figura 1-9 se muestra la medición de una señal escalón utilizando diferentes longitudes de cable en la terminal común, obsérvese cómo a menor longitud la fidelidad de la señal es mejor.

Figura 1-9

Efectos de la longitud del cable de la terminal común en una punta de prueba.



Fuente: ABCs of Probes Primer, 2005

Es importante destacar que entre más alta sea la frecuencia de la señal que se desea medir menor tendrá que ser la longitud del cable de la terminal común a fin de evitar disminuir la fidelidad de la señal.

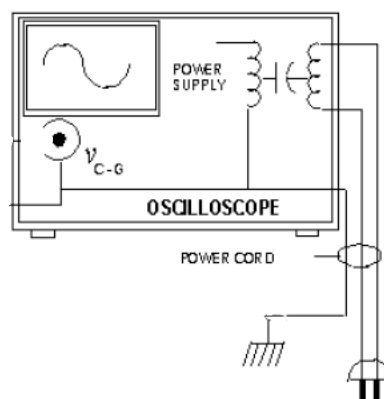
Señales no referidas a tierra.

También hay casos en los que se requiere realizar mediciones de tensión, en las que ningún punto involucrado en la medición es tierra. Estos casos se presentan comúnmente en el área de las comunicaciones, de la electrónica de potencia y de la bioingeniería por nombrar algunas. Este tipo de señales reciben diferentes nombres como son: Señales diferenciales, señales no referidas a tierra y señales flotantes. Conceptualmente los últimos dos nombres son más adecuados ya que como se comentó anteriormente cualquier tensión por definición es una señal diferencial. Así:

Una señal no referida a tierra es aquella en la que el punto de referencia no es la tierra del circuito.

La fuente de los problemas que se presentan al utilizar un osciloscopio de diseño tradicional para realizar mediciones de señales flotantes es el sistema de tierra. Este sistema es una medida de seguridad que proporciona protección al usuario del equipo para evitar que debido a alguna falla o error sufra una descarga eléctrica. En la Figura 1-10 se muestran las conexiones del sistema de tierra en un osciloscopio. Como se ve, el chasis y el común de la señal (el anillo del conector BNC), se encuentran conectados a la tierra física a través de un conductor, normalmente de color verde, que se encuentra dentro del cable de alimentación, este conductor corresponde a la terminal cilíndrica de la clavija. De esta manera el chasis y el común se encuentran a un potencial de cero (o casi cero) V. ([Fundamentals of Floating Measurements 2005](#))

Figura 1-10
Sistema de tierra de un osciloscopio.



Fuente: Why Differential?, 2006

Si un conductor con un potencial mayor a cero V tiene contacto con el chasis o el común de la señal, entonces una corriente circulará hacia tierra a través del conductor de protección, evitando que dicha corriente circule a través del usuario si es que éste toca el chasis o el anillo del conector BNC. Si la intensidad de corriente es de magnitud considerable podría activar otros sistemas de protección como son: un interruptor termo magnético o un fusible.

Esta situación obliga a que las mediciones que se realicen utilizando un osciloscopio aterrizado sean todas referidas a su tierra, impidiendo así realizar mediciones de diferencia de potencial en las que ninguno de los puntos se encuentra conectado a ésta.

Debido a esta limitación se han desarrollado diferentes opciones, que van desde procedimientos de medición hasta accesorios para osciloscopio, de modo que se pueda realizar la medición de señales no referidas a tierra utilizando un osciloscopio.

4.2 Medición de señales no referidas a tierra.

Históricamente se han utilizado dos métodos que permiten realizar mediciones flotantes utilizando un osciloscopio tradicional, de los cuales se da una breve descripción.

Medidas pseudodiferenciales.

Este método requiere de un osciloscopio con al menos dos canales que cuente con las funciones aritméticas de inversión y suma. El procedimiento para realizar la medición es como sigue:

1. Conectar la terminal común de las puntas de prueba a tierra.
2. Conectar la punta de prueba del canal dos al punto con menor potencial (B).
3. Invertir la señal del canal dos.
4. Conectar la punta de prueba del canal uno al punto con mayor potencial (A).
5. Activar la función de suma, la cual suma ambos canales.

El trazo resultante después de seguir los pasos anteriores será la señal diferencial entre los puntos A y B.

Este procedimiento puede resultar útil en algunas ocasiones, sin embargo al no ser una medida diferencial pura el rango de modo común se ve limitado ([Fundamentals of Floating Measurements 2005](#)). Adicionalmente si se considera que para realizar una medición se requieren dos puntas de prueba y utilizar dos canales, el método resulta poco práctico y limitado.

Flotar un osciloscopio referido a tierra.

Este método consiste en desactivar el sistema de tierra del osciloscopio, ya sea físicamente desconectando el conductor de tierra o utilizando un transformador de aislamiento. Al realizar esta acción se permite que el chasis y el común del osciloscopio adquieran el potencial al que se conecte la terminal común de la punta de prueba y se deja expuesto al usuario a sufrir una descarga eléctrica. Adicionalmente se atenta contra el aislamiento del transformador de potencia lo cual puede significar un riesgo oculto, ya que no falla inmediatamente pero en algún momento puede fallar y hacer presentes los riesgos de choque eléctrico y de incendio ([Floating Oscilloscope Measurements ...1998](#)).

Flotar un osciloscopio no sólo es inseguro, también las mediciones que se realizan utilizando este método son incorrectas debido a que la capacitancia total del chasis del osciloscopio se conecta directamente al circuito en prueba en el punto en que se conecta la terminal común de la punta de prueba ([Floating Oscilloscope Measurements ...1998](#)).

ESTE MÉTODO NO ES SEGURO Y RESULTA PELIGROSO UTILIZARLO POR LO TANTO JAMÁS DEBE SER UTILIZADO.

Ya que los métodos anteriores presentan ciertas desventajas y riesgos, se han diseñado instrumentos y accesorios adecuados para realizar este tipo de mediciones. En la Tabla 1-4 se muestra un resumen de los diferentes métodos que pueden ser utilizados para realizar mediciones flotantes.

Tabla 1-4
Métodos para realizar mediciones flotantes.

	Cumple con los principios de seguridad en instrumentación.	Ancho de banda / Rango dinámico	Facilidad de operación	Tensión de modo común	Tensión de modo diferencial	Rechazo al modo común.
Amplificadores de aislamiento	✓	Alto	Medio	< 850 V _{RMS}	< 850 V _{RMS}	Alto
Puntas de prueba activas diferenciales de alta tensión	✓	Medio	Alto	< 2 200 V _{RMS}	< 4 400 V _{RMS}	Medio
Amplificadores diferenciales	✓	Medio +	Medio -	< 353 V _{RMS}	< 353 V _{RMS}	Alto
	PRECAUCIÓN			UNICAMENTE		
Osciloscopios de baterías	✓	Bajo	Alto	< 30 V _{RMS}	< 30 V _{RMS}	Bajo
Osciloscopios con canales aislados	✓	Alto	Alto	< 600 V _{RMS}	< 1000 V _{RMS}	Bajo
Transformador de aislamiento	¡ATENCIÓN! Esta es una práctica insegura y peligrosa y no debe ocuparse.					
Desconexión del conductor de tierra	¡ATENCIÓN! Esta es una práctica insegura y peligrosa y no debe ocuparse.					

Fuente: [Floating Oscilloscope Measurements...1998.](#)

Puede observarse que contar con un accesorio que permita realizar mediciones diferenciales nos ayuda a mantener al operador seguro y a mantener la integridad de la señal. Una punta de prueba activa diferencial no sólo se recomienda para la medición de señales flotantes, sino también para realizar mediciones referidas a tierra ya que mejora la integridad de la señal.

5 Punta de prueba activa diferencial.

Una punta de prueba activa diferencial es una variante especializada de la punta de prueba convencional optimizada para la adquisición de señales flotantes. Para maximizar el rechazo de modo común (CMR) éstas puntas proveen dos caminos casi idénticos e independientes para las señales, se trata de igualar la atenuación, la respuesta en frecuencia y el tiempo de retardo. Normalmente se utiliza un amplificador diferencial para su construcción; Éste se puede ver como un convertidor de señal flotante a señal con referencia a tierra.

CAPÍTULO 2 DISEÑO DE UNA PUNTA DE PRUEBA ACTIVA DIFERENCIAL

1 Introducción

En este capítulo se desarrolla el proceso de diseño de una punta de prueba activa diferencial. Primero se estudia la estructura de este tipo de puntas. Se describen las partes que la conforman explicando su función y se desarrolla el marco teórico que sustenta el proceso de diseño.

De este modo se tiene un panorama de lo que es una punta de prueba activa diferencial y las condiciones generales para el diseño de la misma. Posteriormente se plantean las especificaciones de diseño que cumplirá la punta de prueba y se comienza el diseño y selección de los componentes.

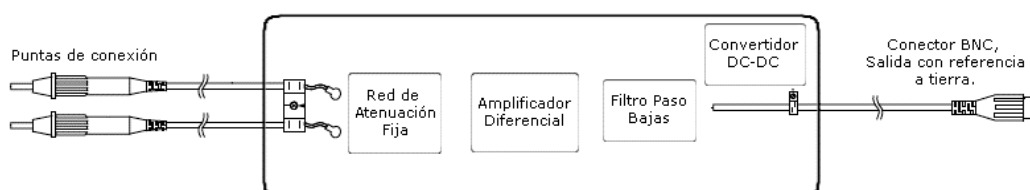
Al final del capítulo se integran las partes diseñadas y se obtiene el diagrama del circuito definitivo. Se realiza la simulación del circuito para comprobar el comportamiento del mismo y se realiza el diseño del circuito impreso que se utilizará en la implementación y presentación del proyecto.

2 Estructura de una punta de prueba activa diferencial.

Una punta de prueba activa diferencial es un accesorio para osciloscopio que permite la medición de señales eléctricas no referidas a tierra de manera que se mantenga la integridad del equipo, la señal y el operario. En la Figura 2-1 se muestra su estructura en un diagrama a bloques.

Figura 2-1

Diagrama a bloques de una punta de prueba activa diferencial.



Fuente: Elaboración propia.

En lo que resta del trabajo de tesis se hará referencia a la punta de prueba activa diferencial simplemente como punta de prueba, o accesorio. Si se requiere hacer distinción de otros accesorios o puntas de prueba se utilizarán los nombres completos para cada accesorio o punta de prueba.

2.1 Puntas de conexión

Las puntas de conexión son el medio que permite la conexión eléctrica entre el equipo de medición y el circuito bajo prueba. Éstas son una pieza importante de la punta de prueba ya que permiten que la conexión sea confiable y segura de modo que se pueda realizar la medición sin demeritar la calidad de la señal y que el operador tenga dificultad para realizar la conexión.

Cuentan con un medio de contacto que puede ser en forma de punta o un medio de sujeción normalmente en forma de pinzas caimán o gancho. Éste último es el recomendado ya que permite al operador tener libres las manos para realizar otras acciones a fin de obtener la medición deseada.

A diferencia de las puntas de conexión de las puntas de prueba pasivas, las dos terminales están constituidas de las misma forma, es decir, se ocupa el mismo tipo de cable, la misma longitud y el mismo método de contacto o sujeción en ambas terminales. En las puntas de prueba pasivas esto se evita para no demeritar la señal debido a la inductancia de la terminal común, este fenómeno aunque si se presenta no es significativo en una punta de prueba activa diferencial ya que no se tienen corrientes por tierra y la impedancia de entrada en ambas terminales es elevada, normalmente en el orden de los mega Ohm. (Why Differential?, 2006)

En general las puntas de conexión deben ser diseñadas o elegidas de modo que se consideren los niveles de tensión, corriente y categoría en las que operarán. Así, éstas deben igualar o superar las especificaciones de operación de la punta de prueba a fin de mantener seguro al operador.

En vista de que el armado de una punta de conexión que cumpla con las normas de seguridad no es trivial, lo recomendado es utilizar puntas de conexión comerciales, de esta manera el tiempo de diseño del proyecto se disminuye. Además podemos encontrar en el mercado juegos de puntas de conexión, como el que se muestra en la Figura 2-2 que nos permiten hacer de la punta de conexión un accesorio muy versátil.

Figura 2-2
Kit de puntas de conexión.



Fuente: Sitio Web de Pomona Electronics.

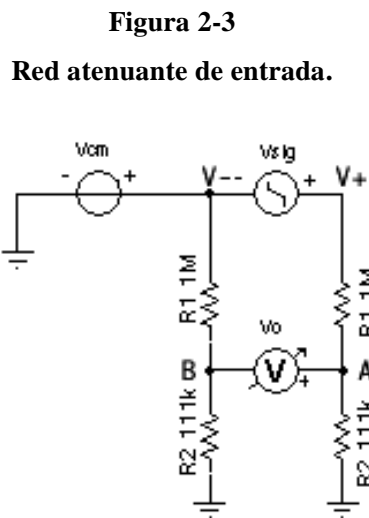
2.2 Red de atenuación fija.

Las puntas de conexión realizan una conexión eléctrica entre los puntos en los que se encuentra la señal que deseamos medir y la entrada de una red atenuante. La red atenuante tiene como función disminuir la amplitud de la señal a un nivel adecuado que permita la manipulación de la señal por el accesorio y los instrumentos de medición.

En el mercado es posible encontrar puntas de prueba con diferentes factores de atenuación que van desde 10 hasta 500. Lo más común es encontrarlas con dos factores de atenuación, 10 y 100, los cuales se seleccionan utilizando un interruptor o botón selector.

El factor de atenuación del sistema no depende exclusivamente del diseño de la red atenuante de entrada. Si se observa con atención el diagrama de la Figura 2-1 se aprecia que las etapas siguientes pueden afectarlo y por lo tanto éste es función de la red de entrada, del amplificador diferencial y del filtro. El diseñador determinará la forma más adecuada de lograr la atenuación deseada según las necesidades que se deseen cubrir.

La red de atenuación normalmente está constituida por un par de divisores de tensión idénticos, uno para cada punta de conexión como se muestra en la Figura 2-3. Esta red tiene un factor de atenuación fijo, es decir, la relación de los divisores de tensión se mantiene constante.



Aún en puntas de prueba que permiten la selección del factor de atenuación del sistema, el factor de atenuación de la red de entrada es fijo. El cambio en el factor de atenuación del sistema se logra cambiando la ganancia del amplificador diferencial y/o del filtro a la salida. Existen dos razones principales por las que se hace de esta manera:

1. La red de atenuación debe ser una red de precisión con una tolerancia de emparejamiento entre las resistencias de 0.01%⁵ y coeficientes de temperatura de 3 ppm/°C.
2. Al ser una red de precisión el costo de ésta suele ser elevado.

⁵ Ver apéndice A para el desarrollo de un ejercicio de demostración para la tolerancia de emparejamiento.

Al controlar la atenuación del sistema mediante la ganancia del amplificador diferencial se introduce menor error en el sistema ya que la ganancia se configura con una resistencia, y por lo tanto sólo es necesario controlar el valor de un elemento para lograr diferentes factores de atenuación.

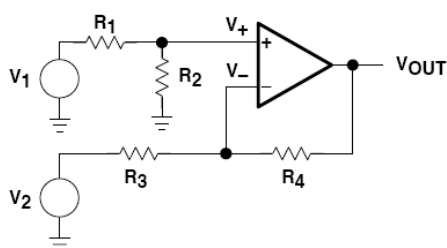
Es recomendable que la red de entrada tenga un factor de atenuación mucho mayor que el mayor en las especificaciones de diseño y que el amplificador diferencial opere con ganancia. Por ejemplo, si deseamos que el factor de atenuación del sistema sea de 10 y 20; Se podría diseñar una red de atenuación de entrada con un factor de 40 y el amplificador diferencial con dos ganancias intercambiables: 2 y 4, de esta forma se cumplirían las especificaciones de diseño.

Si la punta de prueba tiene un factor de atenuación fijo, se puede optar por que la red haga el trabajo de atenuación y el amplificador diferencial tenga ganancia unitaria.

2.3 Amplificador diferencial

Un amplificador diferencial amplifica la diferencia de potencial aplicada entre sus terminales de entrada. Este tipo de amplificador normalmente se implementa utilizando un amplificador operacional configurado como se muestra en la Figura 2-4. Para el análisis del circuito se recurre al teorema de superposición, el cual nos permite determinar la tensión a la salida del circuito de una manera sencilla.

Figura 2-4



Haciendo referencia a la Figura 2-4 tenemos:

Anulando la fuente V_2 se calcula el efecto de V_1 en el circuito. Al hacer esto se tiene un amplificador no inversor con ganancia:

$$G = 1 + \frac{R_4}{R_3} \quad \text{Ec. 2-1}$$

Para determinar la tensión en la terminal no inversora se utiliza un divisor de tensión:

$$V_+ = \frac{R_2}{R_2 + R_1} V_1 \quad \text{Ec. 2-2}$$

Así la salida debida a V_1 es:

$$V_{o+} = GV_+ = \frac{(R_3 + R_4)R_2}{R_3(R_2 + R_1)} V_1 \quad \text{Ec. 2-3}$$

Anulando la fuente V_1 se calcula el efecto de V_2 en el circuito. Al anular V_1 se tiene un amplificador inversor con ganancia:

$$G = -\frac{R_4}{R_3} \quad \text{Ec. 2-4}$$

Así la salida debida a V_2 es:

$$V_{o-} = GV_2 = -\frac{R_4}{R_3} V_2 \quad \text{Ec. 2-5}$$

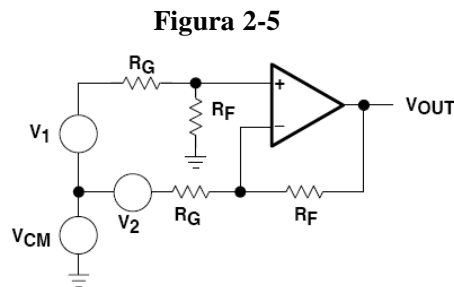
Finalmente la tensión de salida completa es:

$$V_o = \frac{(R_3 + R_4)R_2}{R_3(R_2 + R_1)} V_1 - \frac{R_4}{R_3} V_2 \quad \text{Ec. 2-6}$$

Nótese que cuando $R_2 = R_4$ y $R_1 = R_3$, la tensión a la salida del amplificador es la diferencia de potencial aplicada a la entrada afectada por una ganancia determinada por el valor de las resistencias R_4 y R_3 :

$$V_o = \frac{R_4}{R_3} (V_1 - V_2) \quad \text{Ec. 2-7}$$

Cuando se aplica la condición anterior se dice que se tiene un amplificador diferencial ya que amplifica o atenúa la diferencia de tensión aplicada en sus terminales de entrada. Este tipo de amplificador es particularmente útil cuando se presenta una situación como la que se muestra en la Figura 2-5.



Obsérvese que se tiene una fuente de tensión V_{CM} que se suma tanto a la tensión V_1 como a la tensión V_2 y por lo tanto V_{CM} es una tensión común. Si sustituimos esta condición en la Ec. 2-7 se tiene que:

$$V_o = \frac{R_F}{R_G} (V_1 + V_{CM} - (V_2 + V_{CM})) = \frac{R_F}{R_G} (V_1 - V_2) \quad \text{Ec. 2-8}$$

Se observa que la tensión común V_{CM} se anula y la salida únicamente será la diferencia de potencial $V_1 - V_2$ afectada por el factor R_F / R_G . La capacidad de anular las tensiones de modo común vuelve a este amplificador de gran utilidad ya que nos permite la extracción de señales pequeñas en presencia de tensiones de mayor magnitud o en ambientes de mucho ruido, en otras palabras, es el amplificador que le permite a los ingenieros buscar la aguja en el pajar. Así mismo es importante notar que en la Figura 2-5 las tensiones V_1 y V_2 son señales no referidas a tierra y que la tensión V_{OUT} es una señal referida a tierra, es decir, el amplificador realiza la conversión de señales flotantes a señales referidas a tierra lo que permite realizar mediciones eléctricas con mayor integridad en la señal y romper mallas de tierra.

Hasta el momento el análisis se ha realizado de forma ideal, sin embargo es importante destacar algunos aspectos que en la práctica evitan que se obtenga un comportamiento perfecto de un amplificador diferencial. Por ejemplo, si se debe cumplir con la condición $R_2 = R_4$ y $R_1 = R_3$, haciendo referencia a la Figura 2-4. ¿Cómo nos afectará en la práctica el hecho de que los valores de resistencia de los componentes no sean exactamente iguales?

Esto hace que la Ec. 2-7 pierda validez y las ganancias de la entrada inversora y no inversora sean diferentes. En consecuencia la capacidad del amplificador para anular tensiones de modo común se ve afectada. Éste ya no será capaz de anular la tensión de modo común, sólo podrá atenuarla en cierta medida. Bajo estas circunstancias se dice entonces que el amplificador diferencial tiene tanto una ganancia diferencial (A_d) como una ganancia de modo común (A_{cm}). En la práctica una figura de mérito para medir la calidad de un amplificador diferencial es la tasa de modo de rechazo común (CMRR por sus siglas en inglés) que indica cuánto es que el amplificador puede atenuar una señal de modo común.

La tasa de rechazo de modo común se define como la relación entre la ganancia diferencial y la ganancia de modo común del amplificador.(Kitchin, 2004)

Usualmente ésta relación se expresa en decibles y entonces recibe el nombre de modo de rechazo común.

$$CMRR = \frac{A_d}{A_{cm}} \quad \text{Ec. 2-9}$$

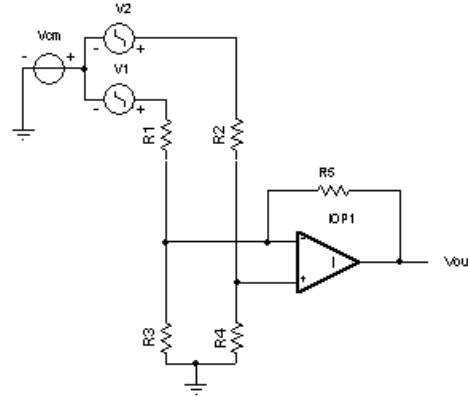
$$CMR = 20\log(CMRR) \quad [dB] \quad \text{Ec. 2-10}$$

De las ecuaciones 2-9 y 2-10 se deduce que valores elevados de la CMRR o del CMR indican que el amplificador es más capaz de atenuar las señales de modo común.

Otra pregunta que surge en la práctica es: ¿Qué rango de tensión en la entrada puede amplificarse sin que ocurra distorsión de la señal? La condición que define el rango se conoce como rango dinámico. El amplificador sólo es capaz de producir una señal de salida que se encuentre dentro del rango de la fuente de alimentación menos un par de volt. Por ejemplo, si el amplificador se alimenta con una fuente de +/- 12 V entonces el amplificador sólo será capaz de producir una señal de salida que se encuentre en el rango de -10 a 10 V. Eso establece el rango dinámico y para que el amplificador opere sin distorsión es nuestra responsabilidad cuidar que la señal se mantenga dentro del rango dinámico.

Con el amplificador diferencial que se ha analizado hasta el momento no sería posible medir una tensión mayor a +/-13 V si el amplificador se alimenta con una fuente de +/- 15V. Una variante del circuito amplificador diferencial básico, la cual se muestra en la Figura 2-6, permite realizar la medición de señales de amplitud mucho mayor a la alimentación del amplificador operacional. Por ejemplo, medir tensiones en el orden de los cientos de volt alimentando al amplificador diferencial con fuentes de +/- 15 V. Ésta variante no requiere una red atenuante separada del amplificador diferencial y puede ser útil al diseñar puntas de prueba con atenuación fija.

Figura 2-6
Amplificador diferencial con red de atenuación



Como puede observarse la variante consiste en agregar un divisor de tensión tanto para la entrada inversora como a la no inversora de modo que la señal que llega a éstas se encuentre dentro del rango dinámico del amplificador diferencial.

Realizando un análisis del circuito de la Figura 2-6 podemos obtener las ecuaciones para la tensión a la salida del circuito (V_{out}).

Anulando a V_1 tenemos un amplificador no inversor con ganancia:

$$G_+ = 1 + \left(\frac{R_5}{R_1 // R_3} \right) \quad \text{Ec. 2-11}$$

La tensión en la terminal no inversora del amplificador está determinada por el divisor de tensión, así se tiene que:

$$V_+ = \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) V_2 \quad \text{Ec. 2-12}$$

La tensión a la salida debida a la señal en la terminal no inversora es entonces:

$$V_{O+} = G_+ V_+ = \left(1 + \frac{R_5}{R_1 // R_3}\right) \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4}\right) V_2 \quad \text{Ec. 2-13}$$

Anulando a V_2 tenemos un amplificador inversor con ganancia:

$$G_- = -\frac{R_5}{R_1} \quad \text{Ec. 2-14}$$

Debe notarse que en la terminal no inversora se tiene una tierra virtual. Así la salida debida a V_1 es:

$$V_{O-} = G_- V_- = -\frac{R_5}{R_1} V_1 \quad \text{Ec. 2-15}$$

Al sumar las respuestas debidas a V_2 y V_1 se tiene que la tensión V_{out} es:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_5}{R_1 // R_3}\right) \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4}\right) V_2 - \frac{R_5}{R_1} V_1 \quad [V] \quad \text{Ec. 2-16}$$

Si:

$$\left(1 + \frac{R_5}{R_1 // R_3}\right) \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4}\right) = \frac{R_5}{R_1} = A \quad \text{Ec. 2-17}$$

Entonces:

$$V_{out} = A(V_2 - V_1) \quad [V] \quad \text{Ec. 2-18}$$

Al igual que el circuito del amplificador diferencial convencional, la variante presentada debe cumplir con una condición para amplificar la diferencia de potencial aplicada a la entrada.

Dicha condición es dependiente del valor de resistencia de los elementos y por lo tanto la variante también se ve afectada por las tolerancias de éstos.

Según Wayne (2000) para obtener un óptimo desempeño de los circuitos se requiere que las resistencias tengan al menos una tolerancia de emparejamiento de 0.01% y que el seguimiento de temperatura sea al menos de 3 ppm/°C. Éstas condiciones son extremadamente complejas, si no es que imposibles de lograr, utilizando componentes discretos para la implementación del circuito. En la práctica son alcanzables al utilizar un amplificador diferencial integrado, el cual tiene las resistencias ajustadas por láser para lograr el emparejamiento de 0.01% y al estar empaquetadas en un mismo chip se logra el seguimiento de temperatura de 3 ppm/°C.

Hasta el momento no se ha mencionado nada al respecto de la respuesta en frecuencia de los circuitos. Las configuraciones de los amplificadores diferenciales mostrados no contienen elementos reactivos y por lo tanto la respuesta en frecuencia del circuito quedará determinada únicamente por la respuesta en frecuencia del amplificador operacional que se seleccione. Es posible elegir amplificadores operacionales de gran ancho de banda que superen las especificaciones de diseño y por lo tanto es común el uso de un filtro paso bajas a la salida del amplificador para limitar el ancho de banda al especificado y disminuir el ruido.

Cuando el ancho de banda que se desea es muy amplio es posible que se requieran elementos reactivos que compensen la respuesta en frecuencia del amplificador. Normalmente para puntas de prueba con anchos de banda en el orden de los mega Hertz es necesario utilizar una red de atenuación compensada. No debemos olvidar que las resistencias presentan fenómenos reactivos a altas frecuencias y por ello la necesidad de la compensación. (Z-Active, 2004)

Los circuitos que se han analizado parecen simples, después de todo son sólo un amplificador operacional con resistencias, sin embargo gracias a los análisis realizados se concluye que:

- En el caso del amplificador diferencial convencional R_2 debe ser igual a R_4 y R_1 debe ser igual a R_3 y para el caso de la variante la condición de la ecuación 2-17 debe ser satisfecha. Así cualquier diferencia en el valor de resistencia de los elementos ocasionará que las ganancias de la entrada inversora y no inversora sean diferentes lo que resulta en una ganancia de modo común no nula. Es decir, los circuitos tienen tanto ganancia de modo diferencial, como ganancia de modo común.
- La ganancia de modo diferencial es normalmente mayor o igual a uno mientras que la ganancia de modo común es idealmente cero.
- Las condiciones para lograr un óptimo desempeño son difíciles de lograr utilizando componentes discretos.
- Amplios anchos de banda requieren compensación de la respuesta en frecuencia.

2.4 Filtro paso bajas.

La función del filtro paso bajas es limitar el ancho de banda de la punta de prueba y reducir el ruido. Se utiliza un filtro de segundo orden, la selección del tipo de filtro y el tipo de respuesta dependerá del resto del sistema y la hará el diseñador para producir la respuesta en frecuencia de la punta de prueba que se desee.

2.5 Salida con referencia a tierra.

La salida con referencia a tierra es el último bloque del accesorio y es el que se conecta al osciloscopio para poder visualizar la señal medida. En este punto los niveles de tensión son adecuados para el instrumento de medición y para lo operador, de modo que el cable se puede manejar fácilmente y forma segura. Se utiliza cable blindado el cual se mantiene corto para evitar recoger ruido del ambiente.

3 Diseño

3.1 Especificaciones de diseño

El diseño de la punta de prueba estará enfocado de modo que cubra las necesidades del usuario final, los estudiantes de las carreras afines a la electrónica. En general los requisitos más demandantes se presentan en las materias relacionadas con la electrónica de potencia, así se buscará que el diseño sea adecuado para realizar las mediciones necesarias en la materia.

Tabla 2-1
Especificaciones de Diseño

Máxima tensión de entrada continua:	± 300	V
Atenuación:	20x	
Ancho de Banda:	0 – 300	kHz
Impedancia de salida:	50	Ω
Impedancia de entrada:	2	$M\Omega$

La punta de prueba debe poder alimentarse fácilmente sin la necesidad de utilizar la fuente de alimentación del laboratorio. Adicionalmente la fuente que se utilice para alimentar el circuito debe garantizar la seguridad del operador al utilizar la punta de prueba.

Se recomienda el uso de baterías ya que permiten que el accesorio sea portátil y simple de utilizar. También se debe proporcionar la posibilidad de utilizar un eliminador de baterías.

Si se comparan las especificaciones de diseño propuestas con las de una punta de prueba comercial⁶, se observará una diferencia considerable. Parecería trivial igualar dichas especificaciones sin embargo para lograrlo se requerirían componentes de alto costo difíciles de conseguir y consideraciones que dificultarían significativamente la implementación del proyecto.

Se opta por aceptar especificaciones disminuidas, pero suficientes en favor de que los alumnos puedan implementar el proyecto y al final tener un accesorio que les permita realizar las mediciones de forma adecuada.

3.1.1 Planeación.

El corazón de una punta de prueba diferencial es el amplificador diferencial y por ello el diseño comenzará desde este elemento.

Para la alimentación se propone el uso de un convertidor CD-CD. Con éste se logrará alimentar al amplificador utilizando una fuente de corriente directa de una sola polaridad, ya sea un eliminador de baterías o una batería. El convertidor no será diseñado y se optará por el uso de un convertidor integrado para disminuir la lista de material y el tamaño de la punta de prueba.

Con el diseño del amplificador diferencial terminado, y con el fin de facilitar la implementación del proyecto se seleccionarán las puntas de conexión de un catálogo de instrumentación de modo que cumplan los requisitos eléctricos y de seguridad.

⁶ Por ejemplo el modelo DP120 de Fluke.

Finalmente se diseñará el circuito impreso de modo que se pueda implementar el proyecto y darle el acabado final en la etapa de implementación.

3.1.2 Amplificador Diferencial

Considerando que el factor de atenuación es fijo para éste diseño se puede utilizar la variante presentada en la sección 2.3. Esta solución implica el uso de una red de resistencias especial que resulta costosa de fabricar o impráctica de realizar con componentes discretos. Analog Devices ofrece diferentes soluciones integradas de amplificadores diferenciales. La oferta de productos de Analog incluye amplificadores que utilizan la configuración clásica y la variante. Se seleccionó la parte con matrícula AD629, un amplificador diferencial que utiliza la variante con ganancia unitaria.

Debido a que la ganancia del AD629 es unitaria y fija será necesario añadir una red atenuante de entrada que proporcione la atenuación indicada en las especificaciones de diseño. La ventaja de utilizar ésta solución es que no se requieren más que dos valores diferentes de resistencia y eso disminuye los costos, adicionalmente si se piden al mismo tiempo las resistencias pertenecen al mismo lote de producción lo cual asegura que tengan características similares disminuyendo los efectos debidos a su tolerancia. La única consideración es que la tolerancia de las resistencias de la red atenuante debe ser al menos de 0.1% y al momento de seleccionarlas buscar el mejor coeficiente de temperatura que se tenga disponible.

La red atenuante de entrada es la que tiene mayor influencia sobre la impedancia de entrada, para poder cumplir con la especificación de $1\text{ M}\Omega$ cada divisor deberá contener una resistencia de $1\text{ M}\Omega$. El valor de la resistencia inferior de los divisores de tensión queda determinada por la relación de división de tensión que en este caso es de 20. Debe considerarse que la resistencia inferior queda en paralelo con la impedancia de entrada diferencial del AD629 que según la hoja de datos es de $400\text{ k}\Omega$.

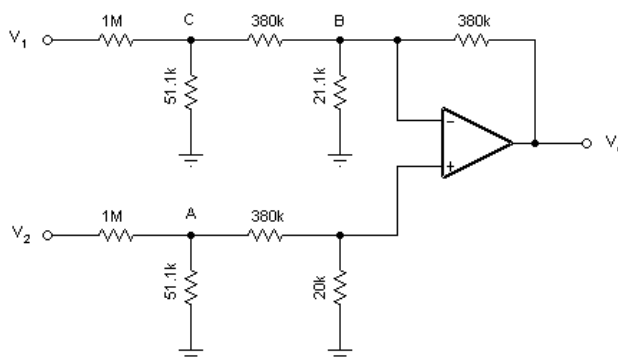
El valor de la resistencia equivalente inferior del divisor de tensión debe ser: 52.63 k Ω . Entonces el valor de la resistencia inferior debe ser: 60.60 k Ω . El valor comercial más cercano es de 60.4 k Ω . Al buscar un proveedor del material la orden mínima para dicho valor de resistencia era de 1000 piezas, por lo que se buscó el valor inmediato inferior que permitiera la compra unitaria, el valor seleccionado fue de 51.1k Ω .

Lamentablemente este valor modificará el factor de atenuación de la punta de prueba ligeramente. Podría agregarse una resistencia variable en serie a fin de complementar el valor y proporcionar un medio de calibración, sin embargo, realizar esta acción implica que la resistencia variable introduzca errores debido a la precisión. La mejor opción es indicar el factor de atenuación en el instrumento.

Analizando el circuito resultante de conectar la red de atenuación al AD629 que se muestra en la Figura 2-7 tenemos:

Figura 2-7

Diagrama del amplificador diferencial con la red atenuante.



Anulando a V_1 tenemos un amplificador no inversor con ganancia:

$$G = 1 + \left(\frac{380k}{R_{eq}} \right)$$

Ec. 2-19

Donde:

$$R_{eq} = [(1M // 51.1k) + 380k] // 21.1k = 20.11k\Omega \quad \text{Ec. 2-20}$$

Entonces:

$$G = 1 + \left(\frac{380k}{20.11k} \right) = 19.896 \quad \text{Ec. 2-21}$$

Para determinar la tensión en la terminal no inversora obtenemos el equivalente de Thévenin en el punto A.

$$V_{THA} = V_2 \left(\frac{51.1k}{1M + 51.1k} \right) \quad \text{Ec. 2-22}$$

$$R_{THA} = 1M // 51.1k = 48.616k\Omega \quad \text{Ec. 2-23}$$

Entonces la tensión en la terminal no inversora es:

$$V_+ = 0.04458(V_2) \left(\frac{51.1k}{1M + 51.1k} \right) \quad \text{Ec. 2-24}$$

$$V_+ = 0.0021673V_2 \quad \text{Ec. 2-25}$$

La tensión a la salida debida a V_2 :

$$V_{o+} = GV_+ = 19.896(0.0021673)V_2 \quad \text{Ec. 2-26}$$

$$V_{o+} = 0.0431V_2 \quad [V] \quad \text{Ec. 2-27}$$

Anulando a V_2 tenemos un amplificador inversor. El punto B es una tierra virtual y por la tanto la resistencia de 21.1 k Ω es anulada. Obteniendo el equivalente de Thévenin en el punto C:

$$V_{THB} = V_1 \left(\frac{51.1k}{1M + 51.1k} \right) \quad \text{Ec. 2-28}$$

$$R_{THB} = 1M // 51.1k = 48.616k\Omega \quad \text{Ec. 2-29}$$

La ganancia del amplificador inversor es:

$$G = - \left(\frac{380k}{380k + 48.616k} \right) = 0.8865 \quad \text{Ec. 2-30}$$

La tensión a la salida debida a V_1 :

$$V_{o-} = GV_1 \left(\frac{51.1k}{51.1k + 1M} \right) = -0.8865 \left(\frac{51.1k}{51.1k + 1M} \right) \quad \text{Ec. 2-31}$$

$$V_{o-} = -0.0431V_1 \quad [V] \quad \text{Ec. 2-32}$$

Finalmente la salida completa del circuito es:

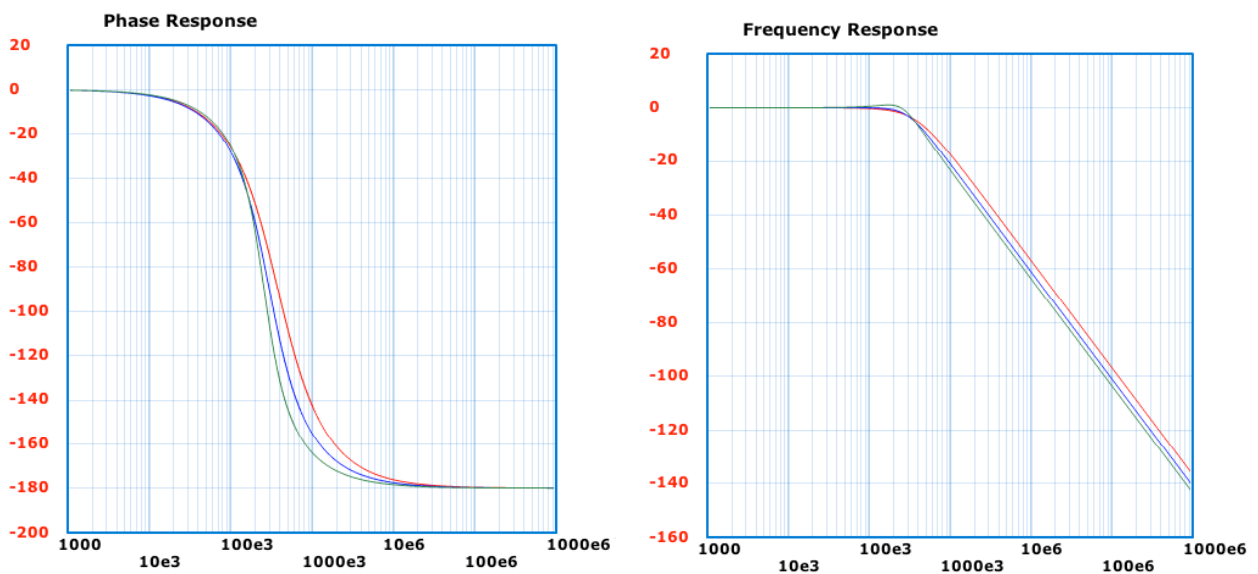
$$V_o = \frac{V_2 - V_1}{23.20} \quad [V] \quad \text{Ec. 2-33}$$

El circuito tendrá una atenuación de 27.3 dB. Se aprecia que existe un error en el factor de atenuación, éste se introdujo al utilizar las resistencias de 51.1 k Ω en la red atenuante.

3.1.3. Filtro paso bajas

Para el diseño del filtro se utilizó la herramienta WebBench de National Semiconductor⁷. En esta aplicación se introducen las especificaciones del filtro y el programa propone diferentes diseños. Adicionalmente nos permite observar diferentes respuestas en frecuencia y así elegir la que más nos convenga. Para el filtro se calcularon diseños para un filtro tipo Sallen-Key de segundo orden con frecuencia de corte en 300 kHz y con respuestas Bessel, Butterworth y Chebyshev 1 dB. En la Figura 2-8 se muestra la respuesta en frecuencia para los tres casos.

Figura 2-8
Respuesta en frecuencia.



El trazo superior corresponde con la respuesta Bessel el trazo central a la Butterworth y el trazo inferior con la respuesta Chebyshev 1 dB.

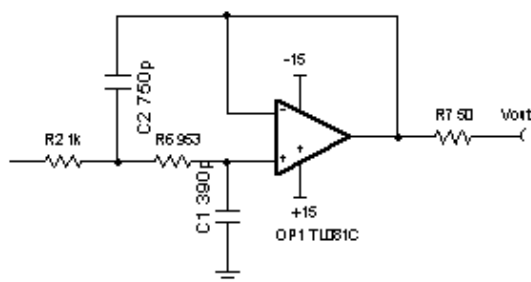
⁷ Herramienta disponible en forma gratuita en el sitio de National Semiconductor (<http://www.national.com/>)

Se seleccionó el filtro con respuesta Butterworth que corresponde con el trazo central.

El circuito del filtro diseñado se muestra en la Figura 2-9

Figura 2-9

Filtro Sallen-Key paso bajas de segundo orden con respuesta Butterworth.



3.1.4. Salida con referencia a tierra

La salida del amplificador operacional es la diferencia de potencial aplicada a su entrada atenuada 23.20 veces. Para que la salida de la punta de prueba cumpla con la especificación de la impedancia de salida se conecta una resistencia de 50 Ω en serie con la salida del amplificador operacional.

Así, la salida con referencia a tierra será una salida que tiene las siguientes características:

$$V_{o\text{MÁX}} = \pm 12.93$$

$$Z_o = 50 \Omega$$

3.2 Lista de material y diagrama final

En la Tabla 2-2 se muestra la lista de material necesaria para poder implementar el circuito definitivo, el cual se muestra en la Figura 2-7. Todos los valores mostrados en la tabla son valores comerciales y debe observarse que la tolerancia de los componentes sea la indicada o mejor. Así mismo, se muestra el tipo de paquete recomendado ya que el diseño del circuito impreso contempla las dimensiones de los paquetes listados.

Si se desea cambiar el tipo de paquete será necesario realizar el diseño de un circuito impreso nuevo.

Tabla 2-2
Lista de material

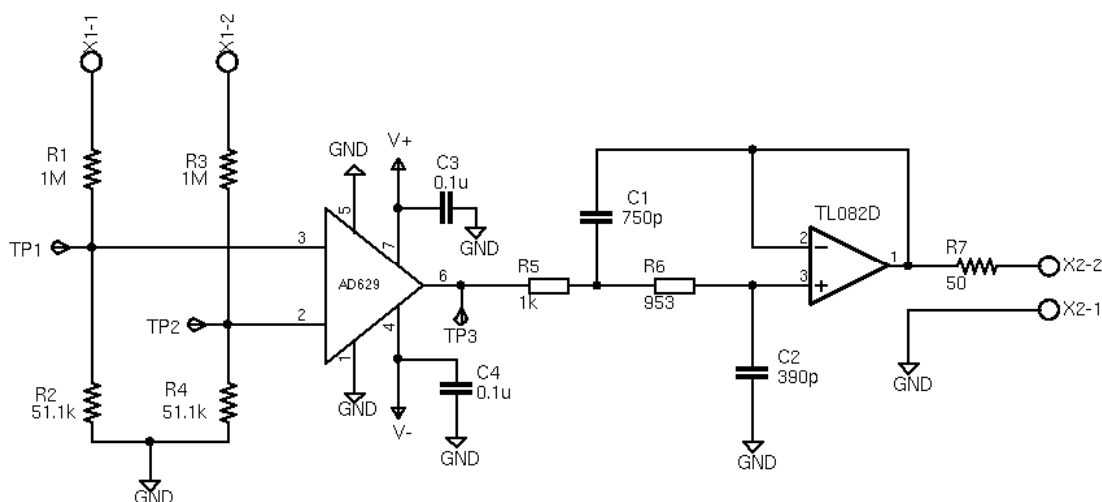
Parte	Valor	Tolerancia	Tipo de paquete
C1	750p	5%	1206
C2	390p	5%	1206
C3, C4	0.1u	5%	1206
R1, R3	1M	0.1%	1206
R2, R4	51.1k	0.1%	1206
R5	1k	0.1%	1206
R6	953	0.1%	1206
R7	50	0.1%	1206
IC1	AD629	-	DIL08
IC2	TL082D	-	SO08
X1	-	-	-
X2	-	-	-
X3	-	-	-
TP1	-	-	-
TP2	-	-	-
TP3	-	-	-
EC6A	$V_i: 9 - 18 \text{ V}$ $V_o: +/- 15 \text{ V}$	-	-

Los componentes de precisión no son fáciles de encontrar en el mercado mexicano convencional al que los alumnos están acostumbrados. Para la adquisición de los componentes se requerirá realizar un pedido a algún proveedor de electrónica como

Newark In One, o Mouser Electrónica⁸. A pesar de que esto parece una complicación para la realización del proyecto, es importante que los ingenieros y los alumnos utilicen las nuevas tecnologías para la adquisición de materiales y componentes que antes eran imposibles de conseguir a fin de que no limiten su conocimiento a componentes convencionales obtenibles en República de El Salvador.

En la Figura 2-10 se muestra el diagrama de la punta de prueba diseñada.

Figura 2-10
Diagrama de la punta de prueba activa diferencial diseñada.



3.3 Circuito impreso

El circuito impreso es un componente esencial de cualquier circuito electrónico y como tal su diseño afectará el comportamiento del circuito. Normalmente en circuitos de baja frecuencia y baja tensión no se requieren muchas consideraciones para lograr que el circuito impreso no afecte el comportamiento del circuito. Algunas recomendaciones generales para el diseño de circuitos impresos simples son:

⁸ Newark In One tiene instalaciones en México y normalmente los envíos vienen de Guadalajara. Mouser Electrónica (<http://www.mouser.com>) es una tienda virtual ubicada en EUA que realiza envíos a México.

1. Mantener las pistas tan anchas como sea posible, en general mayor a 10 mil⁹.
2. Observar la separación entre pistas. Se recomienda que sea mayor a 12 mil.
3. Leer las notas de aplicación de los fabricantes sobre recomendaciones de diseño de circuitos impresos para sus componentes.
4. Poner puntos de prueba que permitan la correcta conexión de los instrumentos de medición.

Para el diseño del circuito impreso se utiliza un programa de cómputo llamado Eagle PCB¹⁰. Este programa facilita el diseño del circuito impreso ya que no sólo nos permite capturar el diagrama y posicionar los componentes en un área, también cuenta con la función de auto-ruta y permite establecer reglas de diseño, con lo que se logra un diseño adecuado y sencillo del circuito impreso.

Debido a que el circuito de la punta de prueba es pequeño y utiliza componentes de montaje superficial, el diseño se hará exclusivamente en la capa superior. De esta manera se logra un proceso de manufactura simple y económico de modo que cualquier persona con un poco de experiencia en el grabado de circuitos pueda realizarlo.

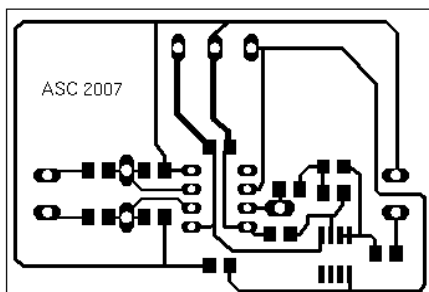
En la Figura 2-11 (a) se muestra el diseño del circuito impreso en escala 1:1, en (b) se muestra la posición de los componentes.

⁹ Mil es una unidad de medida de longitud comunmente utilizada en el área de diseño y manufactura de circuitos impresos. Esta unidad es igual a una milésima de pulgada.

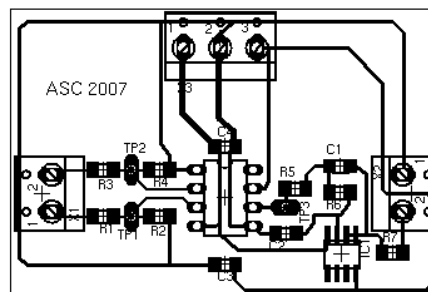
¹⁰ Este programa puede descargarse en forma gratuita de Internet en la siguiente dirección:
<http://www.cadsoftusa.com/>

Figura 2-11

(a) Circuito impreso capa superior.



(b) Posición de los componentes.



4 Simulación

En la actualidad la simulación de circuitos proporciona una herramienta de diseño muy poderosa, ya que permite observar y analizar el comportamiento de los circuitos de una manera sencilla y económica.

Gracias a las ventajas que aporta, la mayor parte de los fabricantes de dispositivos electrónicos y circuitos integrados ponen a disposición de los diseñadores, a través de sus sitios de Internet, los modelos para pspice de sus componentes permitiendo así que las simulaciones sean cada vez más completas y más apegadas al comportamiento real del dispositivo.

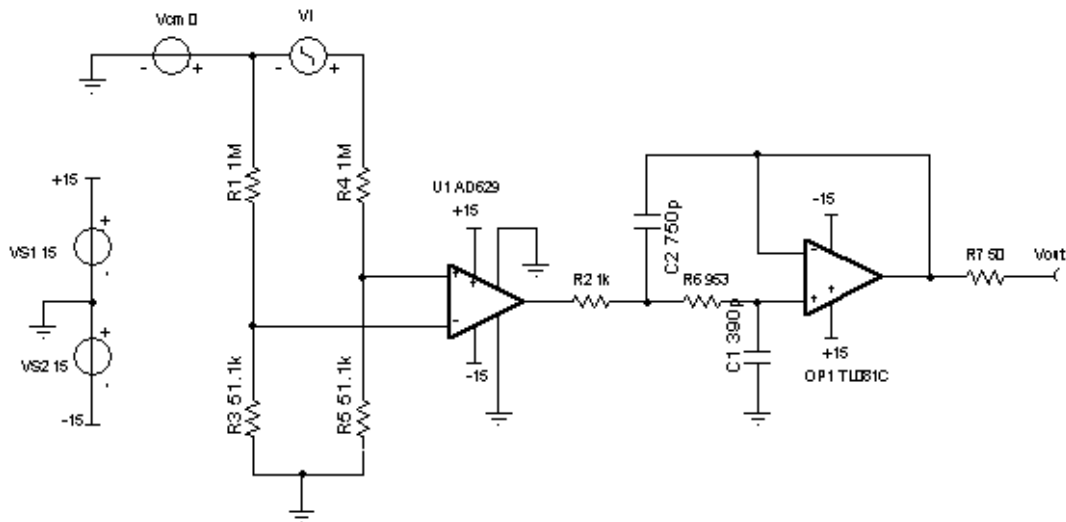
La simulación es un paso más en el proceso de diseño, con ella se pueden obtener resultados aproximados del comportamiento del circuito y realizar mejoras al diseño. Una vez que el diseño teórico se verifica y complementa con la simulación debe armarse un prototipo para verificar el comportamiento real del circuito. Así el diseño electrónico teórico, la simulación y la implementación de prototipos forman un ciclo de mejora continua que se repite hasta obtener los resultados deseados.

En esta sección se muestran los resultados finales de las simulaciones realizadas con las que se verifica el comportamiento del diseño realizado y con las cuales se da paso a la implementación del prototipo para verificar el comportamiento real del circuito.

Para realizar las simulaciones se utilizó el programa Tina Pro 6.0, un software que utiliza como máquina de simulación a pspice. Se seleccionó este simulador ya que es el que presenta la interfaz gráfica más intuitiva, permite la inclusión de modelos, y presenta los resultados de una manera agradable y fácil de entender.

Con el fin de simular el amplificador diferencial AD629 se obtuvo el modelo del sitio de Analog Devices y se incluyó en la librería del simulador. Las simulaciones ejecutadas tienen como fin comprobar las especificaciones de diseño de la punta de prueba. En la Figura 2-12 se muestra el esquema del circuito simulado. V_i es la señal diferencial que se desea medir y V_{cm} es la tensión de modo común presente en el circuito.

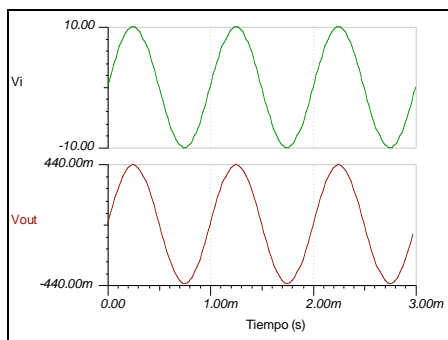
Figura 2-12
Diagrama del circuito simulado.



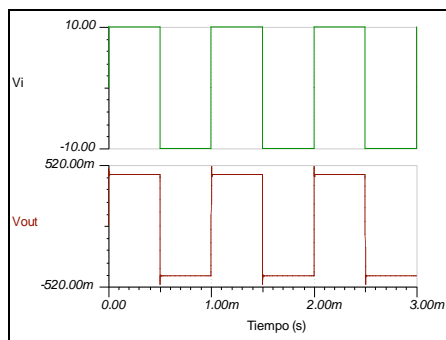
En la Figura 2-13 (a) se muestra una señal de entrada senoidal de 1kHz y 20 Vpp, y la señal de salida, una señal senoidal de 1 kHz y 0.88 Vpp. De donde se observa que el factor de atenuación de la punta es de 27.1 dB. En (b) se muestra como se vería la línea de alimentación al utilizar la punta de prueba. En (c) una señal cuadrada de 20 Vpp y 1kHz, muestra una salida con algo de sobre paso en las transiciones. En (d) se muestra una señal cuadrada de 30 kHz que muestra la limitación en ancho de banda de la punta de prueba.

Figura 2-13

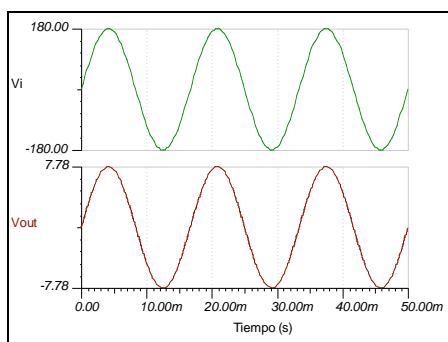
Formas de onda obtenidas al realizar las simulaciones.



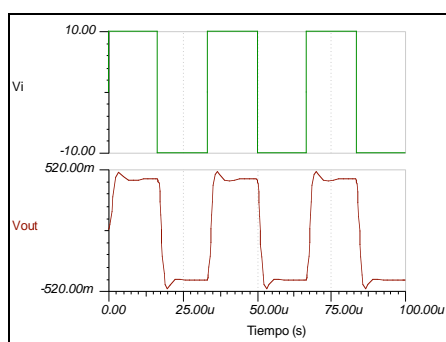
(a)



(c)



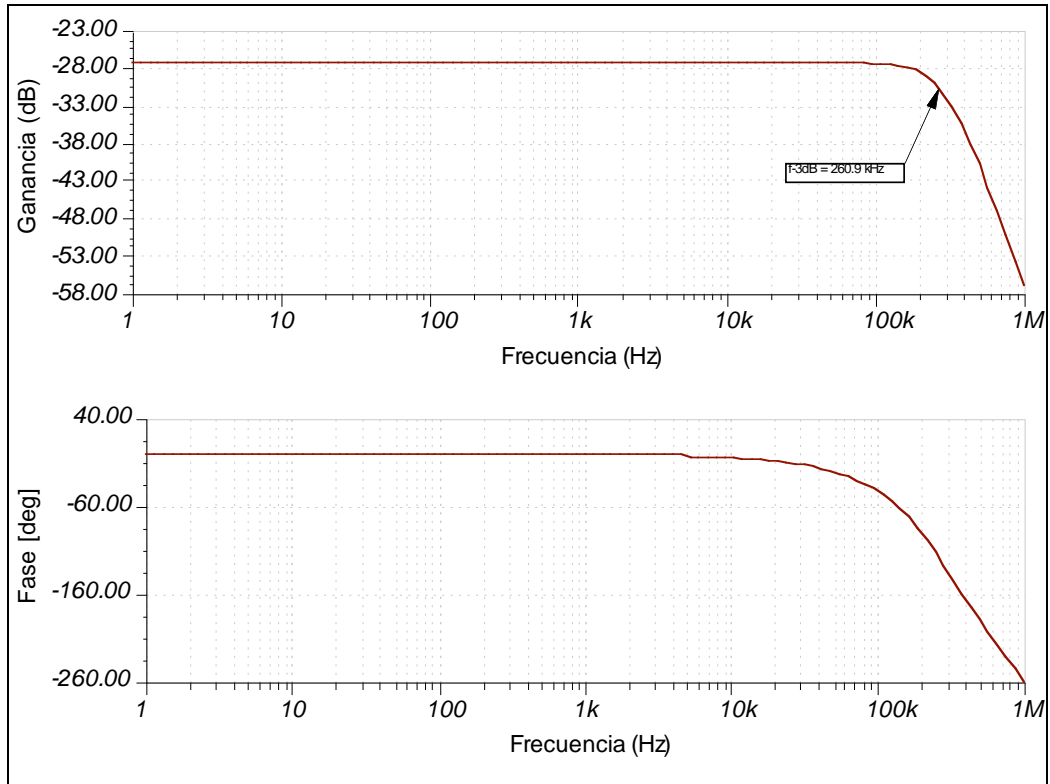
(b)



(d)

En la Figura 2-14 se muestra la respuesta en frecuencia del circuito obtenida con el simulador, la frecuencia de corte de -3 dB es 260.9 kHz.

Figura 2-14
Respuesta en frecuencia.



Con esto el comportamiento del circuito diseñado se ha verificado a nivel de simulación. El siguiente paso es implementar un prototipo a fin de verificar que el circuito cumpla con el comportamiento deseado o realizar las correcciones necesarias.

CAPÍTULO 3

IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE UNA PUNTA DE PRUEBA ACTIVA DIFERENCIAL.

1 Introducción

La fase de implementación de un proyecto siempre resulta de gran interés ya que es de los últimos pasos antes de verificar un diseño y validar su comportamiento o afinar el diseño para mejorarlo. Es en esta fase donde se empieza a ver de manera tangible lo que en un momento fue una idea en la mente, después en papel y en una simulación. Aquí es donde la magia ocurre, donde la teoría converge con la práctica y descubrimos en ocasiones que los modelos teóricos que utilizamos son incompletos y podrían ser mejorados.

Al igual que los desarrollos teóricos la implementación de prototipos y modelos físicos es necesaria para cualquier ingeniero y el desarrollo de habilidades manuales debe constituir parte de la formación de todo ingeniero. Debido a esto en este capítulo se expondrá la forma en que se llevó a cabo la implementación del diseño realizado en el capítulo anterior y a través de diferentes pruebas se verificará el comportamiento real del circuito.

2 Evaluación de costos

En cualquier proyecto antes de comenzar a grabar circuitos impresos y soldar componentes es necesario tener idea de cuánto costará implementar el prototipo y tener todos los materiales y herramientas a la mano.

A continuación se muestra la lista con el costo de los materiales necesarios, los precios están en dólares americanos ya que algunos de los proveedores los manejan así. Se consideraron los precios al público por dos razones:

El cálculo es para el armado de un prototipo y no se adquirirán los componentes por volumen y el cálculo debe ser significativo para un estudiante que decida armar su propia punta de prueba.

Tabla 3-1
Costos del material.

Parte	Valor / Modelo	Tolerancia	Tipo de paquete	Proveedor	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
C1	750p	5%	1206	Mouser Electronics	1	\$0.59	\$0.59
C2	390p	5%	1206	Mouser Electronics	1	\$0.43	\$0.43
C3. C4	0.1u	5%	1206	Mouser Electronics	2	\$0.18	\$0.36
R1. R3	1M	0.1%	1206	Mouser Electronics	2	\$0.74	\$1.48
R2. R4	51.1k	0.1%	1206	Mouser Electronics	2	\$0.74	\$1.48
R5	1k	0.1%	1206	Mouser Electronics	1	\$0.74	\$0.74
R6	953	0.1%	1206	Mouser Electronics	1	\$0.74	\$0.74
R7	50	0.1%	1206	Mouser Electronics	1	\$0.74	\$0.74
IC1	AD629	-	DIL08	Mouser Electronics	1	\$2.50	\$2.50
IC2	TL082D	-	SO08	Mouser Electronics	1	\$1.52	\$1.52
Fuente de poder.	EC6A	-	-	Mouser Electronics	1	\$24.35	\$24.35
Placa fenólica	FR-10X10	-	*	Steren	1	\$1.90	\$1.90
X1	TRT-03	-	-	Steren	1	\$0.90	\$0.90
X2	TRT-02	-	-	Steren	2	\$0.60	\$1.20
Cable blindad con conector BNC	PUN-010	-	-	Steren	1	\$5.00	\$5.00
Puntas de conexión	PUN-510	-	-	Steren	1	\$3.00	\$3.00
TP1	F36-D	-	-	Steren	1	\$0.80	\$0.80
Interruptor	S-116	-	-	Steren	1	\$0.60	\$0.60
Portapila 9 V	258-810	-	-	Steren	1	\$0.40	\$0.40
Caja para prototipos				AG Electrónica	1	\$15.00	\$15.00
						Total:	\$63.73

Debe considerarse adicionalmente un costo aproximado de \$30 USD, por concepto de envío desde EUA. Por lo tanto para la implementación del prototipo se requieren aproximadamente \$1000 pesos mexicanos.

La mayor parte de los componentes se tienen que adquirir, sin embargo el amplificador AD629 puede solicitarse como muestra a Analog Devices y llegará a la puerta de la casa sin costo alguno.

Puede parecer que el costo es elevado para la implementación del proyecto, sin embargo si se compara el costo con el valor de una punta de prueba comercial como el modelo Fluke DP120 de \$450.00 USD¹¹ o el modelo P5200 de Tektronix de \$761 USD, se puede apreciar que el diseño realizado es mucho más económico y a pesar de tener especificaciones de diseño disminuidas en comparación con las puntas de prueba comerciales proporcionará seguridad a un alumno de electrónica.

Cabe resaltar que los altos costos de las puntas de prueba comerciales se deben principalmente a que para su construcción requieren de manufactura sobre pedido de algunos de sus componentes.

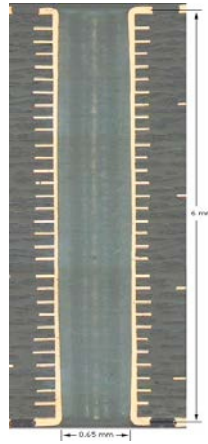
3 Ensamble

La necesidad de una manera sencilla que permita realizar las conexiones eléctricas entre los diferentes componentes que constituyen un circuito eléctrico ha estado presente por cientos de años. Una de las primeras personas en idear un sistema que permitiera la interconexión de los componentes utilizando una tabla de material no conductor con los conductores impresos en su superficie fue Thomas Alva Edison; En una carta que envió a Frank Sprague, el fundador de Sprague Electric y el padre de la tracción eléctrica, Edison describió el uso de tinta conductora para realizar la interconexión de componentes eléctricos (técnica que tardó varias décadas en desarrollarse). En las primeras décadas de 1900 se patentaron diferentes procesos para grabar circuitos eléctricos en placas no conductoras. Muchos de esos procesos tomaron fuerza con el paso de los años y el desarrollo tecnológico (Maxfield, 2003).

Actualmente los procesos industriales de grabado de circuitos impresos se encuentran altamente desarrollados y permiten el desarrollo de tarjetas electrónicas que utilizan hasta 40 capas para realizar las conexiones eléctricas. En la Figura 3-1 se muestra un corte de una placa de circuito impreso de 32 capas.

¹¹ Precios consultados en el portal <http://www.mouser.com> y <http://www.tek.com> .

Figura 3-1
Circuito impreso compuesto por 32 capas.



Fuente: Sitio Web de PPC Electronics AG.

Una lectura interesante sobre circuitos impresos y las diferentes tecnologías de fabricación se encuentra en el capítulo 18 del libro de Clive Maxfield.

En la siguiente sección se describe un método de fabricación de circuitos impresos caseros y para prototipos sencillos.

3.1 Herramienta y equipo necesario

Las herramientas y equipo necesario para poder realizar el ensamble del prototipo es el siguiente:

- Cautín de lápiz de 25 W con base o estación de soldado.
- Soldadura.
- Pasta para soldar.
- Malla para desoldar.
- Cepillo de dientes o fibra de trastes.
- Pinzas de punta aguja.
- Pinzas de corte
- Desarmadores.
- Taladro.
- Bandeja pequeña.
- Plumón indeleble.
- Navaja o exacto.

- Pinzas de relojero o palillos de madera.
- Broca de 1/32 “
- Impresora láser
- Plancha con temperatura variable.
- Segueta o sierra.
- Papel couché o satinado de revista.

La mayoría de estas herramientas forman parte de la caja de herramientas de un alumno regular o tienen acceso a ellas a través de la facultad o en sus casas y por lo tanto no debe haber complicaciones para poder realizar el prototipo.

Grabado del circuito impreso

Cuando es la primera vez que nos enfrentamos a este proceso, puede resultar muy complicado y mientras recorremos la curva de aprendizaje, podemos caer en la desesperación; Por ello en esta sección se describirá el procedimiento para lograr grabar el circuito impreso de la Figura 2-11 en una placa fenólica.

El primer paso es obtener una copia fiel¹² de la Figura 2-11a que nos permita reproducirla fácilmente, de modo que sirva como plantilla. Por ejemplo, puede escanearse el circuito impreso y de esta manera se podrá reproducir fácilmente tan sólo con mandar a imprimir la imagen. También se puede recurrir al proceso de fotocopiado, sin embargo es menos recomendable.

3.1.1 Procedimiento para transferir y grabar el diseño en la placa fenólica.

Impresión del diseño

La impresión del diseño del circuito impreso se realiza sobre una hoja de alguna revista con papel satinado (Muy Interesante, Mecánica Popular) o sobre algún papel especial como el papel couché o transfer.

¹² Pueden escribirme a: alvaro_fi@yahoo.com.mx y les enviaré los archivos originales.

Antes de imprimir el diseño es recomendable que se configure el programa que se este utilizando para que imprima en alta resolución y si la impresora permite elegir el contraste de impresión, seleccionar la opción de mayor contraste de modo que la impresión salga más oscura; Esto ayudará a transferir el diseño a la tableta ya que más toner estará en el papel y al plancharlo se pegará a la tableta.

Planchado del diseño sobre la placa fenólica.

El diseño se transfiere a la placa fenólica a través del planchado. Este paso es el más importante para lograr un circuito impreso limpio, el procedimiento consiste en lo siguiente:

La placa fenólica se limpia utilizando algún solvente o jabón para trastes y se talla con la fibra. Antes de comenzar el planchado se debe poner agua en la bandeja y tenerla a la mano ya que al terminar el planchado la placa se sumergirá en el agua para enfriarla.

Con la tableta limpia y la bandeja lista, se calienta la plancha seleccionando la temperatura para ropa de Seda o Acetato, ya que la plancha se encuentre caliente, se acomoda el papel con el diseño del circuito impreso sobre la placa del lado del cobre y sin moverlo se comienza a planchar sobre el papel, cuando se esté realizando este procedimiento se podrá notar que el papel va quedando pegado a la placa fenólica y que el diseño se transparenta un poco a través del papel, es muy importante que se planche muy bien y por todas partes para que el diagrama se transfiera completamente. Una vez que el papel se encuentre pegado a la placa se toma la placa con las pinzas y se sumerge en el agua. Inmediatamente se toma la placa con las manos y se evita que entren burbujas de aire entre el papel y la tableta.

Una vez que la placa esté fría se retira el papel de revista lentamente tirando de él por una orilla. Toda la sección donde se encontraba el diseño del circuito impreso se quedará pegada, para retirar el papel que se quedó pegado, con agua jabonosa y la fibra o el cepillo de dientes se talla suavemente para no despintar la placa.

El procedimiento anterior rara vez sale la primera vez a menos que se tenga experiencia, así que se recomienda ser paciente ya que seguramente se tendrá que repetir algunas veces hasta lograr que el diseño del circuito impreso se transfiera adecuadamente a la placa fenólica.

Preparación de la placa para el baño de cloruro férrico

Ya que se quitó el papel es necesario revisar si el diseño se transfirió correctamente y si no quedaron pistas abiertas, si es necesario retocar un poco algunas secciones se utiliza el plumón rotulador para tapar o reparar las pistas abiertas.

Grabar el diseño

Para grabar el diseño se sumergirá la placa en cloruro férrico en un recipiente, y se moverá el recipiente inclinándolo de lado a lado a fin de oxigenar el cloruro férrico y acelerar el proceso de grabado. Hay que ir revisando la placa para ver que las secciones que quedaron descubiertas de toner se estén limpiando de cobre, una vez que todo el cobre expuesto haya desaparecido entonces podemos retirar la placa del cloruro férrico. Posteriormente hay que lavar la placa nuevamente con agua a fin de quitar el cloruro férrico y una vez seca, con un solvente remover el toner para descubrir el circuito impreso grabado en cobre.

Para desechar el cloruro férrico debe seguirse un procedimiento, ya que éste no debe ser vertido en el drenaje porque quedan iones de cobre residuales. Puede añadirse carbonato de sodio o hidróxido de sodio para neutralizarlo, esto debe hacerse hasta que el pH de la solución se encuentre entre 7 y 8, realizando la prueba con un papel indicador.

En la solución quedarán residuos de cobre los cuales deben ser removidos por decantación o filtrado, una vez realizado esto es necesario diluir un poco más la solución antes de echarla al desagüe.

Perforaciones

Para realizar las perforaciones adecuadamente es necesario utilizar un taladro de prensa de banco o un Dremel con el accesorio de prensa, para la mayor parte de los componentes se utiliza la broca de 1/32" (0.8mm), esta es una broca muy pequeña y se puede romper muy fácilmente si no se tiene cuidado al taladrar. Es importante acomodar todo antes de poner en funcionamiento el taladro, una vez que la broca se encuentre centrada con la marca de centro, levantar ligeramente para que la broca no toque la tableta, la broca debe de tocar la tableta girando de otro modo puede ser que la broca se rompa o se barra sobre la tableta. Hay que ser paciente y taladrar con calma, de esta manera se asegura que los hoyos queden centrados y sobre todo se evitan accidentes.

Los toques finales

Una vez que se tenga el circuito grabado y con las perforaciones realizadas, se deben estañar las pistas y las huellas de los componentes a fin de que el proceso de soldado sea más sencillo.

Es importante que al final se revise la continuidad en las pistas de la tableta para asegurar que las pistas estén unidas adecuadamente y no existan cortos entre ellas. Antes de colocar los componentes y soldarlos es necesario que se limpie la tableta utilizando algún solvente como acetona para dejar la superficie libre de grasa e impurezas.

3.2 Armado

Cuando se puebla una tableta de circuito impreso es recomendable empezar por los componentes más pequeños, menos altos y más económicos. En el caso del prototipo de la punta de prueba se recomienda seguir el siguiente orden:

1. Resistencias y capacitores.
2. Amplificador TL082.
3. Amplificador AD629.
4. Terminales de conexión.

Para soldar los componentes se recomienda poner una ligera capa de pasta para soldar encima de la huella de los componentes, posteriormente situar el componente y con ayuda de algún instrumento fino, como pinzas de relojero o un palillo, sostener el componente en su posición. Con el cautín tomar muy poca soldadura y hacer contacto con la punta del cautín en la conexión del componente con el circuito impreso.

El procedimiento anterior es adecuado casi para todos los componentes, sin embargo se debe tener especial precaución al soldar las resistencias de $1\text{ M}\Omega$, ya que al ser de alto valor óhmico la pasta puede formar un puente en paralelo con la resistencia y hacer que el valor óhmico de la resistencia disminuya. Por lo tanto es recomendable que para el caso de éstas resistencias se omita el uso de pasta para soldar.

Una vez que se han soldado los componentes al circuito impreso, se debe limpiar utilizando acetona para quitar las impurezas que deja la pasta de soldar en el circuito. De ésta manera se finaliza el armado del prototipo y se pueden realizar las pruebas pertinentes para verificar su comportamiento.

4 Pruebas

Ahora que tenemos el prototipo implementado podemos realizar las pruebas al circuito para comprobar su comportamiento. La etapa de pruebas consistirá en verificar el factor de atenuación, la respuesta en frecuencia, la impedancia de entrada y la impedancia de salida de la punta de prueba.

Para verificar el factor de atenuación basta con introducir una señal con amplitud conocida, que se encuentre dentro del ancho de banda para el que fue diseñada la punta de prueba y medir la amplitud de la señal de salida. Posteriormente se puede calcular la atenuación al obtener la relación entre la señal de salida y la señal de entrada.

Para realizar esta prueba se utilizaron señales con las mismas características que las señales simuladas, de esta manera fue posible verificar la atenuación y al mismo tiempo aportar resultados para validar las simulaciones realizadas.

La Figura 3-2 es una fotografía de la pantalla de un osciloscopio, en la que se muestran un par de señales. El trazo superior es la señal de entrada, una señal senoidal de 1 kHz y 10 V_p. El trazo inferior es la señal de salida con amplitud de 0.425 V e igual frecuencia que la señal de entrada. La atenuación es de: $0.425/10 = 0.0425$, lo que corresponde a un factor de 27.43 dB.

En la Figura 3-3 se realizó la medición de una señal cuadrada con amplitud de 10 V y 1 kHz de frecuencia, la cual se muestra en el trazo superior. La señal de salida nuevamente es el trazo inferior; Se observa sobre paso en las transiciones y poca oscilación en el cambio de estado. El factor de atenuación es nuevamente 27.43 dB.

Como se mencionó en el capítulo 2 una de las ventajas de utilizar una punta de prueba activa diferencial es la posibilidad de realizar mediciones de señales no referidas a tierra y romper mallas de tierra. Se realizó una prueba que consistió en medir la línea de alimentación monofásica del laboratorio utilizando el osciloscopio. El osciloscopio se mantuvo correctamente aterrizado, es decir, no se utilizó ningún transformador de aislamiento ni se desconectó la pata de tierra de la clavija del mismo. Primero se conectó la punta de conexión marcada con el símbolo (+) a la línea, y la punta de conexión marcada con el signo (-) al neutro, posteriormente se intercambiaron las puntas de conexión y se obtuvieron resultados iguales para ambos casos. El resultado se muestra en la Figura 3-4.

Normalmente el intercambio de las puntas de conexión, o la conexión incorrecta de una punta de prueba pasiva hubiera resultado en un corto circuito. Con esto se muestra que es posible realizar las mediciones manteniendo la integridad del operador, del equipo de medición y la señal. Al multiplicar la medición por el factor de atenuación, obtenemos que la tensión en la línea de alimentación era de: $7.6(23.53) = 178.83 \text{ V}_p$.

Figura 3-2

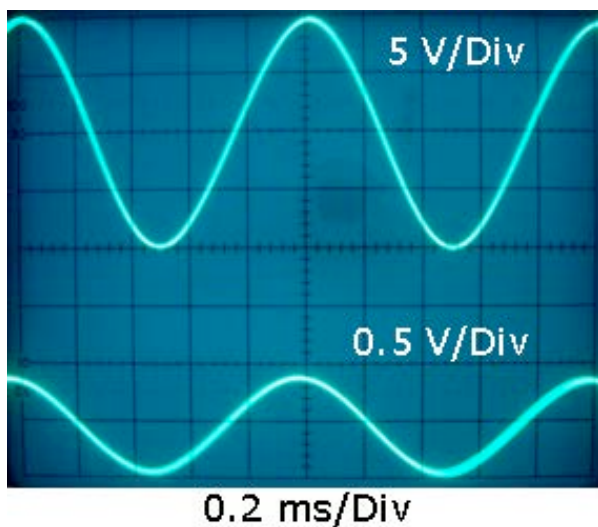


Figura 3-4

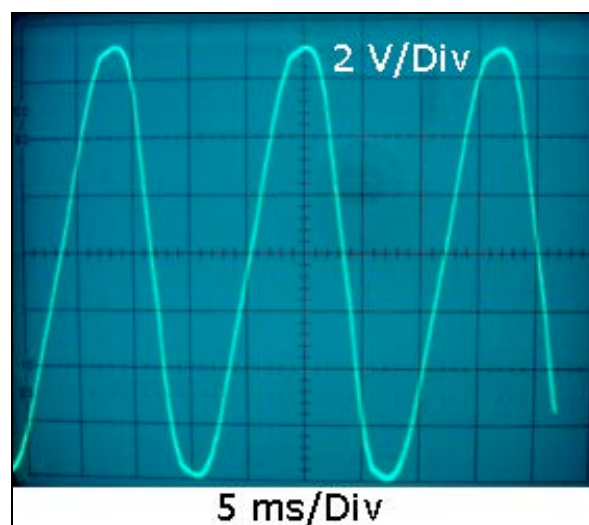


Figura 3-3

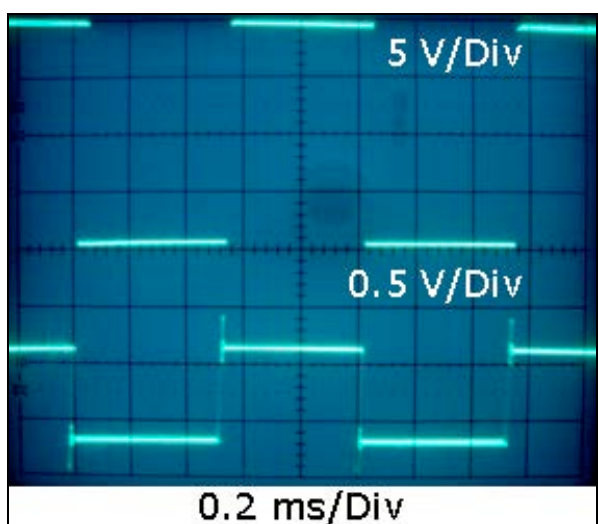
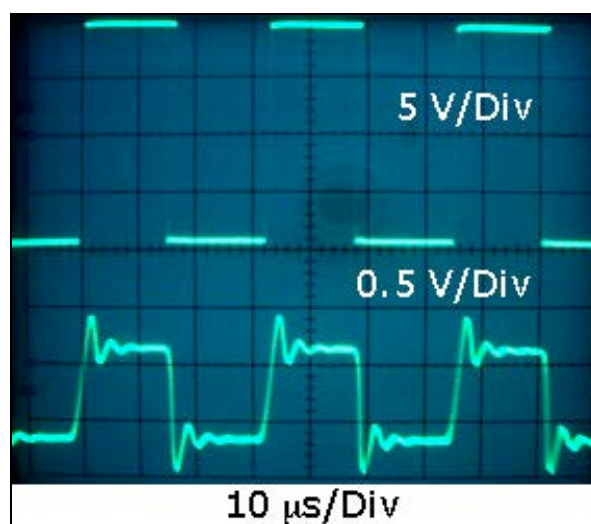


Figura 3-5



Es bien sabido por los ingenieros electrónicos que la mejor señal de prueba es una señal cuadrada, ya que este tipo de señal requiere que el sistema que las procesa tenga una respuesta en frecuencia plana e infinita. Por lo tanto una manera de probar la respuesta en frecuencia de un instrumento es alimentarlo con una señal cuadrada y observar la señal a la salida; Al ir aumentando la frecuencia el sistema perderá la capacidad de reproducirla fielmente y llegará el momento en que la señal cuadrada dejará de serlo convirtiéndose en una señal senoidal. Una regla que se aplica para la selección de instrumentos de medición que serán utilizados para medir señales cuadradas es seleccionar uno que tenga un ancho de banda al menos siete veces más grande que la frecuencia más alta de señal cuadrada que se desea manejar. Otra manera de verlo, es que dado el ancho de banda de un instrumento de medición la frecuencia más alta de señal cuadrada que se puede medir es igual a un séptimo del ancho de banda del instrumento (XYZs of Oscilloscopes, 2001).

En la Figura 3-5 se capturó la pantalla del osciloscopio cuando se alimentó una señal cuadrada de 30 kHz (trazo superior) a la punta de prueba. La salida muestra una señal cuadrada con sobre paso y con oscilación considerable en los cambios de estado. Aún es posible distinguirla como una señal cuadrada. Si se aumenta la frecuencia resulta imposible asegurar que el trazo corresponde con una señal cuadrada, por lo tanto el límite de frecuencia para medición de señales cuadradas utilizando la punta de prueba diseñada se encuentra cerca de los 30 kHz.

Para poder caracterizar en forma adecuada la respuesta en frecuencia se realizaron una serie de mediciones de amplitud y fase en función de la frecuencia. Los datos recopilados se muestran en la Tabla 3-2 y en la Tabla 3-3.

Tabla 3-2

Medición de la ganancia en función de la frecuencia

f [Hz]	A1	A2	A _{prom}	G	G [dB]
1	0.86	0.85	0.855	0.04275	-27.38
10	0.86	0.85	0.855	0.04275	-27.38
100	0.86	0.85	0.855	0.04275	-27.38
1000	0.86	0.85	0.855	0.04275	-27.38
10000	0.86	0.85	0.855	0.04275	-27.38
20000	0.86	0.85	0.855	0.04275	-27.38
30000	0.86	0.85	0.855	0.04275	-27.38
40000	0.86	0.86	0.86	0.043	-27.33
50000	0.86	0.86	0.86	0.043	-27.33
60000	0.88	0.87	0.875	0.04375	-27.18
70000	0.88	0.87	0.875	0.04375	-27.18
80000	0.92	0.91	0.915	0.04575	-26.79
90000	0.92	0.91	0.915	0.04575	-26.79
100000	0.94	0.93	0.935	0.04675	-26.60
150000	1.06	1.05	1.055	0.05275	-25.56
200000	1.2	1.19	1.195	0.05975	-24.47
250000	1.24	1.23	1.235	0.06175	-24.19
300000	0.9	0.8	0.85	0.0425	-27.43
330000	0.6	0.5	0.55	0.0275	-31.21

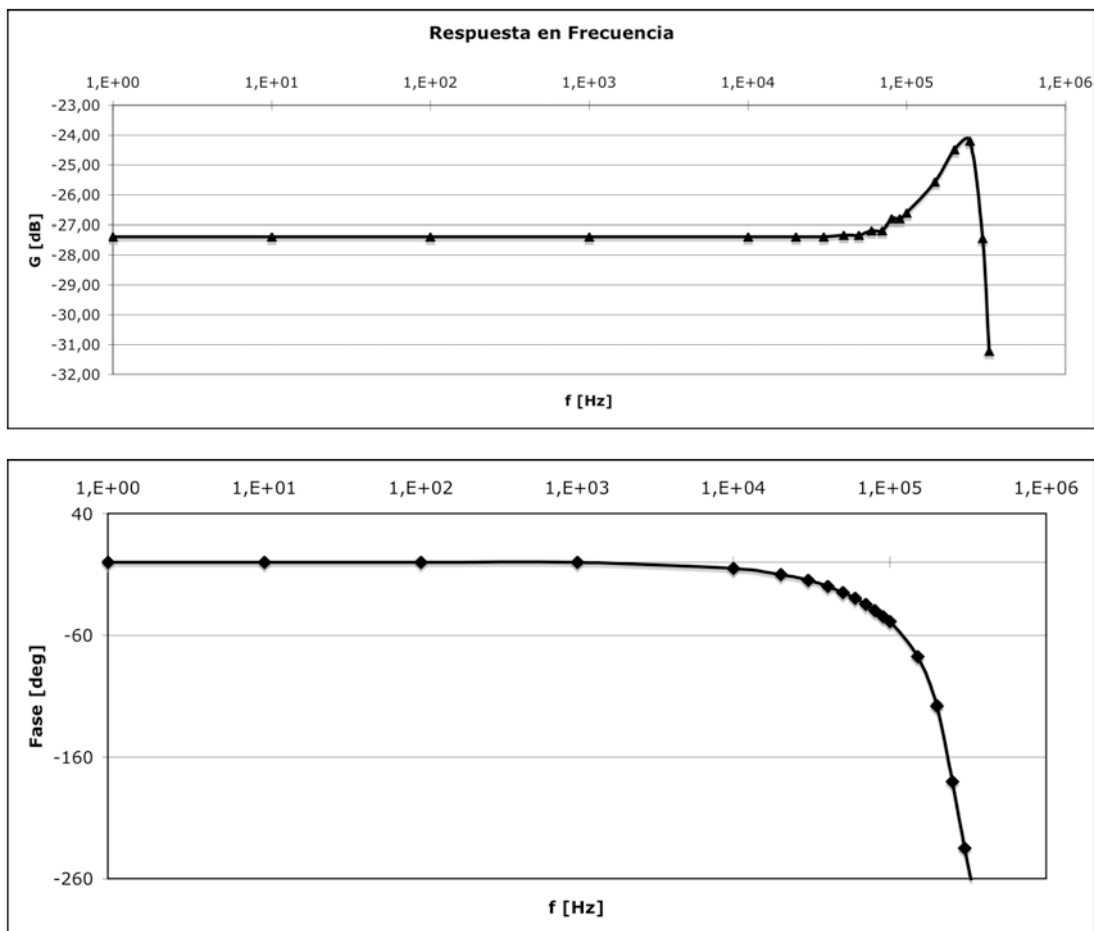
Tabla 3-3

Medición de la fase en función de la frecuencia.

f [Hz]	L1	L2	L _{prom}
1	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00
100	0.00	0.00	0.00
1000	0.00	0.00	0.00
10000	-5.40	-4.50	-4.95
20000	-10.80	-9.00	-9.90
30000	-16.20	-13.50	-14.85
40000	-21.60	-18.00	-19.80
50000	-27.00	-22.50	-24.75
60000	-32.00	-27.00	-29.50
70000	-37.80	-31.50	-34.65
80000	-43.20	-36.00	-39.60
90000	-48.60	-40.50	-44.55
100000	-50.40	-46.80	-48.60
150000	-78.30	-76.95	-77.63
200000	-118.80	-117.00	-117.90
250000	-180.00	-180.00	-180.00
300000	-237.60	-232.20	-234.90
330000	-267.30	-255.42	-261.36

Al graficar los datos de la Tabla 3-2 y Tabla 3-3 se obtiene el diagrama de Bode de la punta prueba, el cual se muestra en la Figura 3-6 y nos permite observar fácilmente el comportamiento de la misma para diferentes frecuencias. Se observa que más o menos a partir de los 60 kHz la atenuación de la punta disminuye y la menor atenuación se obtiene para señales en el orden de los 250 kHz. Es importante tener presente este comportamiento ya que si se deseara medir señales mayores a los 60 kHz el rango de tensión de entrada de la punta de prueba ya no será de ± 300 V, será menor. También se observa que al ancho de banda de -3 dB se encuentra cercano a los 300 kHz. Posteriormente al realizar la medición para determinar el ancho de banda se determinó que el ancho de banda es de 322 kHz.

Figura 3-6
Diagrama de Bode

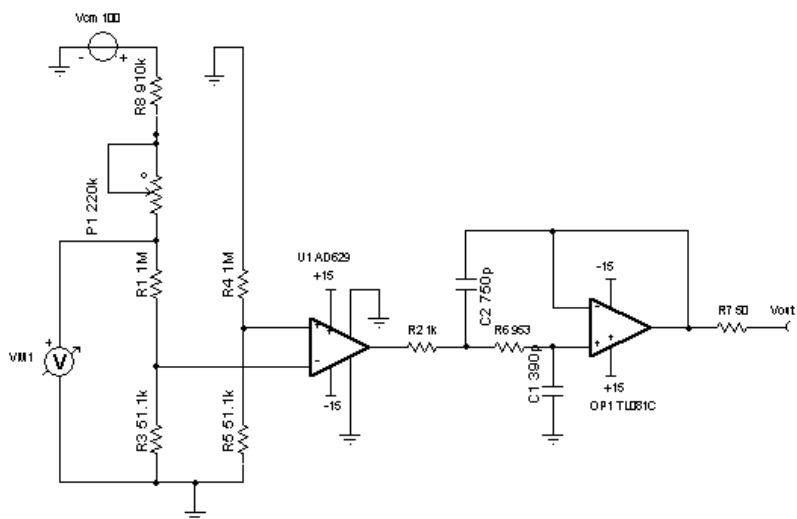


Debe observarse también que la fase del sistema se mantiene en 0 grados para frecuencias menores a los 10 kHz, si se miden señales mayores a ésta frecuencia se deberá tener cuidado al observar las señales. Por ejemplo si se observa una señal de 250 kHz se tendrá la señal invertida a la salida y podría ocasionar confusión si no se está conciente de que es el comportamiento normal de la punta de prueba.

Finalmente se determinaron las impedancias de entrada y salida. Para la impedancia de entrada se armó el circuito de la Figura 3-7, se ajustó el valor de la resistencia variable hasta que la señal de entrada, primero una señal de DC y posteriormente una senoidal de 10 V_p y 1 kHz, mostrara una amplitud de la mitad. Posteriormente se midió el valor de resistencia que había entre la resistencia R8 y la resistencia variable P1. El resultado fue de: 1.04 MΩ. Se cambió el circuito de prueba a la otra entrada del amplificador y se midió el mismo valor de impedancia de entrada. Por lo tanto la impedancia de cada entrada a tierra es de 1.04 MΩ y la impedancia entre las dos entradas es de 2.08 MΩ.

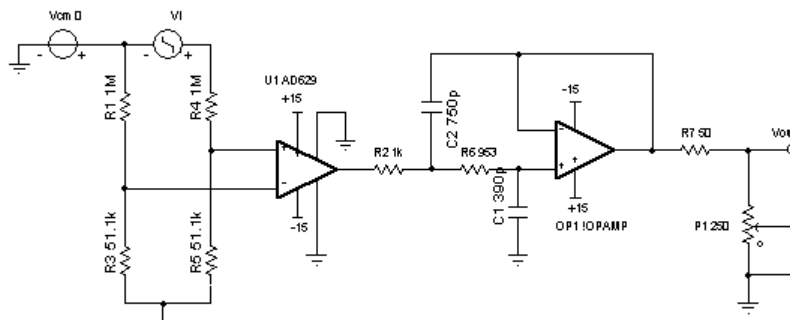
Figura 3-7

Circuito para determinar la impedancia de entrada.



La impedancia de salida se determinó utilizando el circuito que se muestra en la Figura 3-8. Se utilizó una señal senoidal de 10 V de amplitud y 1 kHz de frecuencia. Se ajustó el valor del potenciómetro hasta que se obtuvo la mitad de la señal a la salida, posteriormente se midió el valor de resistencia en las terminales del potenciómetro y se obtuvo que la impedancia de salida es de: 48 Ohm.

Figura 3-8
Medición de la impedancia de salida.



Con las pruebas al prototipo terminadas se termina el ciclo de diseño y se puede presentar los resultados y conclusiones del proyecto.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

Las pruebas realizadas aportan datos que permiten validar el comportamiento del circuito diseñado al compararlos con los resultados obtenidos con el modelo teórico y las simulaciones realizadas.

En la Figura 4-1 se muestran las diferentes señales de prueba que se utilizaron para validar el diseño. En la columna izquierda se muestran los resultados obtenidos al utilizar el simulador y en la derecha las fotografías de la pantalla del osciloscopio al probar las mismas señales en el prototipo de la punta de prueba. Puede observarse que las simulaciones aportan resultados significativos sobre el comportamiento del circuito y se aprecia la valía de la simulación como segunda etapa de diseño. Debe notarse que al aumentar la frecuencia la diferencia entre los resultados obtenidos con el simulador y los reales es mayor, esto se debe a que los modelos de los elementos utilizados en la simulación son simplificados y algunos no consideran efectos adicionales debidos a la frecuencia.

En la Figura 4-2 se muestra la comparación de la respuesta en frecuencia obtenida con el simulador y la respuesta en frecuencia real que presenta el prototipo. En estas gráficas se aprecia fácilmente que la simulación pierde validez para las frecuencias altas. A pesar de estas diferencias la simulación no deja de ser una herramienta de gran utilidad en el proceso de diseño y gracias al armado de prototipos se puede validar y mejorar un diseño.

Figura 4-1

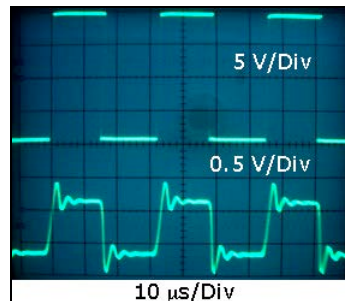
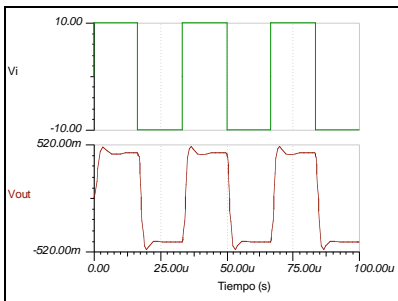
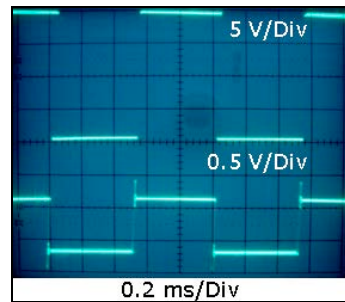
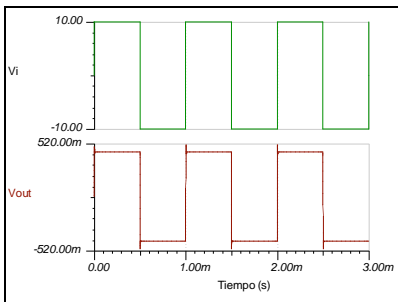
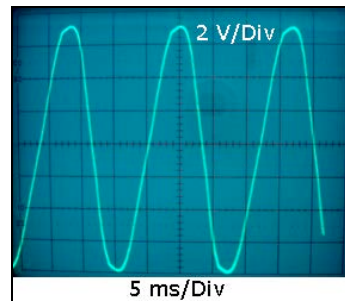
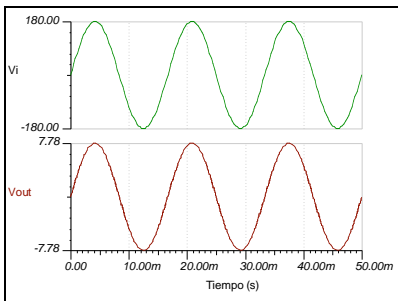
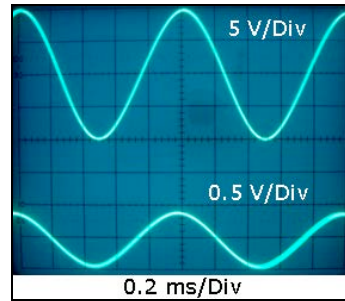
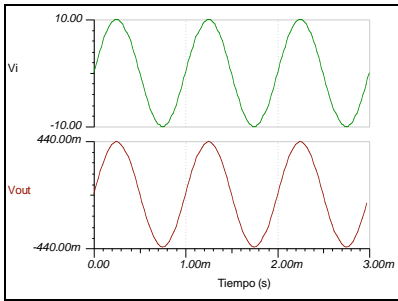
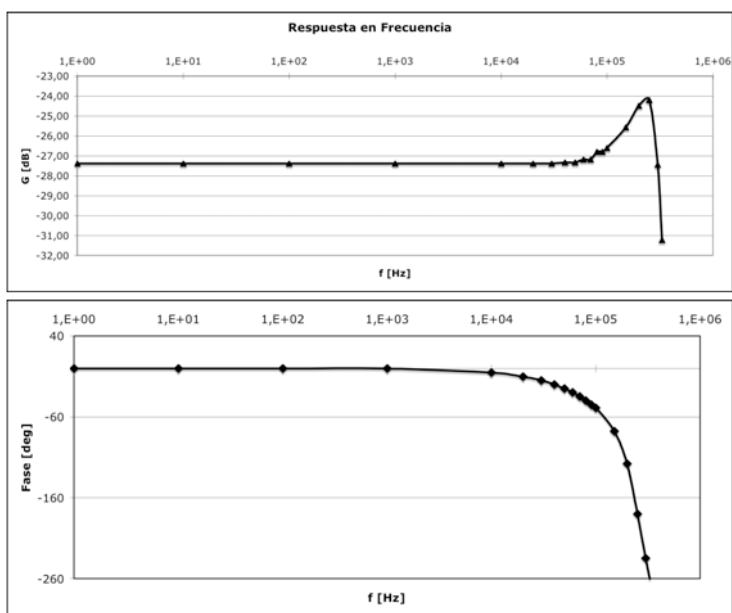
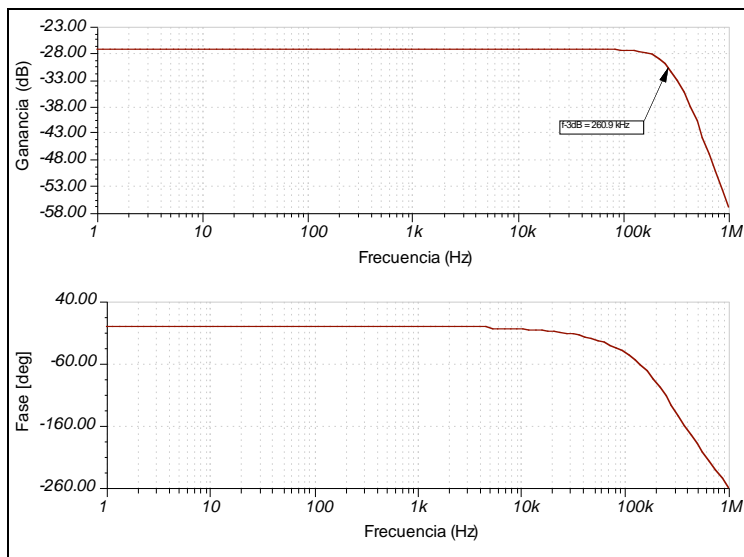


Figura 4-2



Finalmente las especificaciones de la punta de prueba diferencial diseñada son:

Máxima tensión de entrada continua ¹³ :	± 290	V
Atenuación:	23.39x	
Ancho de Banda:	0 – 322	kHz
Impedancia de salida:	48	Ω
Impedancia de entrada:	2.08	$M\Omega$

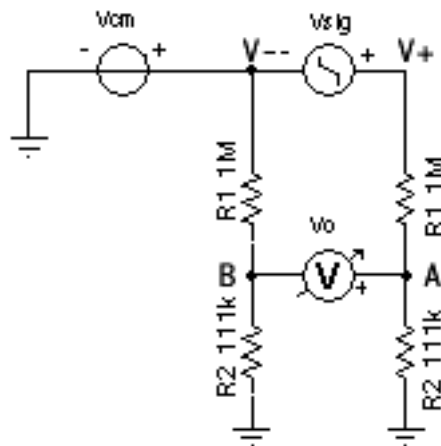
¹³ Esta característica es la única que no se comprobó debido a que no se contaba con el equipo necesario para conducir la prueba de manera segura.

APÉNDICES.

Apéndice A.

Comprobación de tolerancia de emparejamiento para obtener un alto modo de rechazo común.

Figura A-1
Red Atenuante



Con referencia en la Figura A-, la señal de salida de la red atenuante es:

$$V_o = V_A - V_B \quad [V] \quad \text{Ec. A-1}$$

Las tensiones en los puntos A y B están dadas por:

$$V_A = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (V_+ + V_{cm}) \quad [V] \quad \text{Ec. A-2}$$

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (V_- + V_{cm}) \quad [V] \quad \text{Ec. A-3}$$

Sustituyendo las ecuaciones A-2 y A-3 en la ecuación A-1 y en virtud de que ambos divisores son iguales tenemos que:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (V_+ - V_-) \quad [V] \quad \text{Ec. A-4}$$

La ecuación A-4 muestra que la tensión V_{CM} fue anulada gracias a que ambos divisores son idénticos. Sin embargo si consideramos para fines de análisis que la R_2 en el divisor del lado del punto B entonces la tensión en dicho punto será:

$$V_B = \frac{R_2(1-E)}{R_1 + R_2(1-E)} (V_- + V_{cm}) \quad [V] \quad \text{Ec. A-5}$$

Si sustituimos la ecuación A-5 y la ecuación A-2 en A-1 entonces la tensión a la salida del divisor será:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (V_+ + V_{cm}) - \frac{R_2(1-E)}{R_1 + R_2(1-E)} (V_- + V_{cm}) \quad [V] \quad \text{Ec. A-6}$$

Separando la tensión común de la diferencial:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_+ - \frac{R_2(1-E)}{R_1 + R_2(1-E)} V_- + \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_2(1-E)}{R_1 + R_2(1-E)} \right) V_{cm} \quad [V] \quad \text{Ec. A-7}$$

Podemos calcular el modo de rechazo común de la red atenuante si consideramos que el término entre paréntesis es una ganancia de modo común y que existe una ganancia diferencial para la señal. Recordando que:

$$CMR = 20 \log \left(\frac{A_d}{A_{cm}} \right) \quad [dB] \quad \text{Ec. A-8}$$

Bajo las siguientes condiciones:

- $V_{cm} = 100$
- $V_{sig} = 100$
- Divisor 10:1

Podemos hacer un análisis numérico para observar el comportamiento del CMR en función de la tolerancia de R_2 . Los resultados del análisis numérico se muestran en la Tabla A-1.

Tabla A-1

%E	Vd [V]	Ad [V / V]	Vcm [V]	Acm [V / V]	Vo [V]	CMRR [dB]
10.00%	9.9909991	0.099909991	0.908355223	0.009083552	10.89935432	20.82706404
5.00%	9.9909991	0.099909991	0.451897377	0.004518974	10.44289648	26.89138199
1.00%	9.9909991	0.099909991	0.090017922	0.000900179	10.08101702	40.90559877
0.10%	9.9909991	0.099909991	0.008993697	8.9937E-05	9.999992797	60.91341333
0.01%	9.9909991	0.099909991	0.000899289	8.99289E-06	9.991898389	80.9141944

Del análisis realizado se concluye que si se desea un buen desempeño de la red atenuante, la tolerancia de emparejamiento entre las resistencias que conforman la red de entrada no debe ser mayor a 0.01%.

BIBLIOGRAFÍA.

- ABCs of Probes Primer.* (2005). USA: Tektronix, Inc. Consultado el 7 de Julio de 2006, en <http://www.tektronix.com/>
- Aston, R. (1990). *Principles of Biomedical Instrumentation and Measurement* (pp. 49-72). USA: Merrill Publishing Company.
- Controlling Electrical Hazards* (OSHA 3075). (2002). USA: Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Consultado el 17 de Agosto de 2006, en <http://www.osha.gov/>
- Dalziel, C. F. (1961). *Deleterious Effects of Electric Shock*. Geneva. Consultado el 22 de Octubre de 2006, en http://www.llnl.gov/es_and_h/sourcematerial/earm_1961.pdf
- Edlich, R. F., & Drake, D. B. (2005, August 8). Burns, Electrical. USA: eMedicine. Consultado el 24 de Septiembre de 2006, en <http://www.emedicine.com/plastic/topic491.htm>
- El ABC de la Seguridad en las Mediciones Eléctricas.* (2003). USA: Fluke Corporation. Consultado el 2 de Enero de 2007, en <http://www.fluke.com/>
- Electrical Safety. Safety and Health for Electrical Trades. Student Manual.* (2002). USA: National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Consultado el 17 de Agosto de 2006, en <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2002-123/2002-123a.html>
- García Márquez, R. (1999). *Efectos fisiológicos de la corriente eléctrica.* En *La Puesta a Tierra de Instalaciones Eléctricas* (pp. 55-69). México: Alfaomega Grupo Editor S.A. de C.V.
- Heart and Vascular Health Glossary* Consultado el 17 de Enero de 2006, en <http://www.health.uab.edu/default.aspx?pid=23563#V>
- IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. Std 80-1986* (1986). USA: IEEE. Consultado el 22 de Octubre de 2006, en <http://www.ieee.org/>
- Kitchin, C., & Counts, L. (2004). *A Designer's Guide to Instrumentation Amplifiers.* USA: Analog Devices.
- Limits for people safety related to coupling into telecommunications system from a.c. electric power and a.c. electrified railway installations in fault conditions (ITU-T No. K.33). (1997). Consultado el 30 de Octubre de 2006, en <http://eu.sabotage.org/www/ITU/K/K0033e.pdf>

- Mancini, R. (2001, September). *Op Amps For Everyone*. USA: Texas Instruments. Consultado el 17 de Junio de 2007, en <http://focus.ti.com/lit/an/slod006b/slod006b.pdf>
- Maxfield, C. (2003). *BeBop to the Boolean Boogie An Unconventional Guide to Electronics*. U.S.A: Newnes.
- Moghimi, R. (2002, August 8). *Ways to Optimize the Performance of a Difference Amplifier* (No. AN-589). USA: Analog Devices. Consultado el 18 de Febrero de 2007, en <http://www.analog.com/>
- Steele, J. (2003, December 19). *What's Different About Difference Amplifiers?* Analog Zone. Consultado el 18 de Febrero de 2007, en <http://www.analogzone.com/acqt1222.pdf>
- Towle, L. C. (2003). *Safety*. en W. Boyes (Ed.), *Instrumentation Reference Book* (pp. 793-801). USA: Elsevier Science.
- Wayne, S. (2000, January). Finding the Needle in a Haystack: Measuring small differential voltages in the presence of large common-mode voltages. *Analog Dialogue*, 34(1). Consultado el 18 de Febrero de 2007, en <http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/34-01/haystack/index.html>
- Why Differential? White Paper. LeCroy. Consultado el 8 de Julio de 2006, en <http://www.lecroy.com/>
- XYZs of Oscilloscopes*. (2001). USA: Tektronix, Inc. Consultado el 7 de Julio de 2006, en <http://www.tektronix.com/>
- Z-Active: A New High Performance Probe Architecture. (2004, August). USA: Tektronix. Consultado el 17 de Junio de 2007, en <http://www.tektronix.com/>